

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ВИТЕБСКИЙ ОБЛАСТНОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
НОВОПОЛОЦКИЙ ГОРОДСКОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
ПОЛОЦКИЙ ГОРОДСКОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Материалы международной научно-технической конференции,
посвященной 35-летию машиностроительного факультета
Полоцкого государственного университета
(Новополоцк, 19 – 20 октября 2011 г.)**

Под общей редакцией
академика, д-ра техн. наук, проф. А. И. Гордиенко,
д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега



Новополоцк
ПГУ
2011

УДК 621(082)

И66

Редакционная коллегия

Н. Н. Попок (председатель), В. П. Иванов (зам. председателя),
Р. С. Хмельницкий (отв. секретарь), А. П. Кастрюк,
А. А. Лысов, В. А. Данилов, А. Л. Лисовский

И66 Инновационные технологии в машиностроении : материалы
междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак.
ПГУ, Новополоцк, 19 – 20 октября 2011 г. / Полоц. гос. ун-т; под общ.
ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – 304 с.

ISBN 978-985-531-254-4.

Отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки; рассмотрены вопросы создания современных материалов, изготовления, упрочнения и обеспечения качества деталей машин, автоматизации производства, эксплуатации, восстановления ресурса, модернизации и диагностики автомобилей и сельскохозяйственной техники.

Освещены актуальные проблемы инновационной деятельности и трансфер технологий в машиностроении, обеспечения подготовки кадров.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических специальностей учреждений образования.

УДК 621(082)

ISBN 978-985-531-254-4

© УО «Полоцкий государственный университет», 2011

ИННОВАЦИОННАЯ ПОЛИТИКА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ПЕРИОД ДО 2020 ГОДА

И. В. Войтов

Государственный комитет

по науке и технологиям Республики Беларусь, Минск

Рассмотрены основные итоги выполнения Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2007 – 2010 годы. Приведены перспективные направления инновационного развития промышленности и науки Республики Беларусь.

В 2010 году в нашей стране завершено выполнение первой Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2007 – 2010 годы.

Госпрограммой решались две основные задачи: построение Национальной инновационной системы и модернизация материально-технической базы производства для достижения качественно нового технологического уклада в отраслях экономики.

В рамках выполнения мероприятий Госпрограммы создано или модернизировано 985 предприятий и производств и почти 13 тысяч новых рабочих мест. При этом более 70 % производств создано на основе отечественных разработок и с участием отечественной науки.

Национальным статистическим комитетом отмечено, что за период реализации госпрограммы доля новой продукции в объеме промышленного производства возросла с 13,8 до 19,5%, сертифицированной продукции – с 68,8 до 70,3%, при этом снизилась степень износа активной части основных средств.

В ходе выполнения заданий Госпрограммы созданы или построены:

в металлургии:

– производство бесшовных горячекатаных труб на Белорусском металлургическом заводе;

в производстве бытовой техники:

– производство автоматических стиральных машин в закрытом акционерном обществе «Атлант», выпускавшего ранее только холодильники;

– совместно с КНР производство бытовой техники «Горизонт-Мидеа», специализирующееся на выпуске СВЧ-печей, в перспективе номенклатура продукции будет расширяться;

в машиностроении:

– поставлены на производство новые модели тракторов «Беларус-921» на Сморгонском агрегатном заводе и «Беларус-320» на Бобруйском заводе

тракторных деталей и агрегатов; низкопольные городские автобусы второго поколения средней пассажироместимости в ОАО «МАЗ». Этим же предприятием освоен выпуск автопоездов нового поколения повышенной грузоместимости для международных и междугородних перевозок, автощеповозы, бортовые тягачи.

К принципиально новой технике, освоенной по Госпрограмме, можно отнести производство базовых шасси автомобиля и прицепа для автопоездов грузоподъемностью до 50 т в ОАО «МЗКТ» и самоходных зерноуборочных комбайнов КЗС-10К на ПО «Гомсельмаш»;

в лесопереработке:

– построен завод по производству газетной бумаги с лесопильным производством и производством деревянных домов, клееных изделий из древесины в г. Шклове;

в производстве строительных материалов:

– создано производство листового полированного стекла в акционерном обществе «Гомельстекло».

в области энергетики:

– созданы мини-ТЭЦ, в том числе и с использованием местных видов топлива в Пружанах и Жлобине;

– построена ГЭС на реке Щара.

– построены малые гидроэлектростанции на реке Клева в Березинском районе, на реке Рыбчанка в Молодечненском районе, на реке Плиса в Смолевичском районе;

– проведена модернизация Лукомльской ГРЭС, Жодинской ТЭЦ, Минской ТЭЦ-3. На станциях установлено прогрессивное оборудование, позволяющее повысить КПД использования топлива;

в фармацевтической промышленности:

– созданы производства новых лекарственных форм на предприятиях «Завод «Изотрон» и «БелВитунифарм».

В 2011 году Правительством принята новая **Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2011 – 2015 годы**. Модель дальнейшего экономического роста республики учитывает происходящие процессы в мире и основывается на высокотехнологичных и эффективных производствах.

В результате выполнения Госпрограммы ожидается:

– значительный рост экспорта,
– трехкратный рост объемов экспорта высокотехнологичной продукции, решение вопросов импортозамещения по большинству видов продукции;
– вхождение Республики Беларуси в число наиболее конкурентоспособных стран мира.

Реализация Госпрограммы направлена на достижение к концу 2015 года:

– удельного веса отгруженной инновационной продукции – до 20,0%;

- доли инновационно-активных организаций – не менее 40,0%;
- объема экспорта наукоемкой и высокотехнологичной продукции – 7 950 млн долларов США.

Внутренние затраты на научные исследования и разработки должны составить 2,5...2,9% к ВВП.

В рамках госпрограммы планируется выполнить более 900 проектов по созданию новых предприятий и производств, из которых 235 являются важнейшими, имеющими определяющее значение для развития республики.

Будут реализованы крупные структурообразующие инвестиционные и инновационные проекты в фармацевтической промышленности, нефте-химической и химической промышленности, в области энергетики и энергосбережения, в машиностроении и металлургии, строительстве и промышленности строительных материалов.

Фармацевтическая промышленность

Использование инновационных разработок на предприятиях фармацевтической промышленности позволит увеличить долю отечественных препаратов на внутреннем рынке фармацевтической продукции до 50 %, увеличить экспорт лекарственных препаратов в 2 раза, при этом импортоемкость произведенной продукции уменьшится до 32,7 %. В производстве будет освоено 197 новых лекарственных средств.

Нефтехимическая и химическая промышленность

В результате реализации проектов госпрограммы концерном «Белнефтехим» глубина переработки нефти достигнет 92%; доля высокооктановых бензинов возрастет с 70 до 96%; доля дизельного топлива с ультранизким содержанием серы возрастет с 16,4 до 95,5%.

С учетом растущих потребностей внутреннего рынка особое внимание в госпрограмме будет также уделено производству минеральных удобрений.

Энергетика и энергосбережение

В этой области предусмотрено строительство АЭС мощностью 2400 МВт с обеспечением пуска первого блока в 2016 году; завершение строительства Гродненской ГЭС мощностью 17 МВт, строительство Полоцкой ГЭС мощностью 21 МВт. Решение этих и других задач позволит увеличить к 2015 году долю собственных энергоресурсов до 28...30% и уменьшить долю природного газа в потреблении до 64%.

Машиностроение и металлургия

В рамках госпрограммы планируется строительство на РУП «БМЗ» завода по производству листового проката с выпуском новой продукции – горячекатаного листа шириной от 800 до 1850 мм, толщиной от 0,8 до 25 мм, что снизит зависимость предприятий промышленного комплекса республики от импорта.

Развитие производства машин и оборудования будет направлено на расширение модельного ряда автомобилей, освоение производства автобу-

сов второго поколения повышенной пассажировместимости и на их базе троллейбусов, создание нового семейства автопоездов уровня Евро-4 и Евро-5. Реализация поставленных задач обеспечит рост валовой добавленной стоимости в производстве машин и оборудования в 1,55 раза, а их экспорт – в 2,5 раза, транспортных средств и оборудования – соответственно в 1,7 раза и 2,5 раза.

Строительство и промышленность строительных материалов

Госпрограммой намечается ввести в строй три новых технологических линии по производству цемента на основе современных энергосберегающих технологий. Проектами предусматривается замена природного газа на уголь и использование других альтернативных видов топлива. Ввод этих линий обеспечит прирост базовых мощностей по производству цемента в 2 раза и позволит полностью обеспечить потребность внутреннего рынка и увеличить экспортные поставки цемента до 1500 тыс. тонн в год.

В рамках мероприятий по совершенствованию инновационной инфраструктуры Государственной программы предусматривается создание ряда крупных технопарков, а также холдингов с участием научных организаций, инжиниринговых компаний, проектных и конструкторских организаций.

Предстоит создать эффективную вертикаль и горизонталь управления в сфере инновационной деятельности. На предприятиях будут воссозданы полноценные исследовательские, конструкторские и инжиниринговые подразделения, созданы или переданы научным учреждениям опытные производства для научных разработок и освоения совершенно новой продукции.

УДК 539.2

НОВЫЕ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЕ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. И. Гордиенко

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

Представлены новые многофункциональные и специализированные материалы и покрытия с повышенными механическими, износо-, коррозионно-, жаростойкими и другими свойствами.

Физико-технический институт НАН Беларуси является одной из ведущих организаций республики, выполняющих научные исследования и разработки в области материаловедения, создания новых многофункциональных и специализированных материалов и покрытий с повышенными механическими, износо-, коррозионно-, жаростойкими и другими свойствами.

В результате проведенных исследований комплексной переработки алюминиевого шлака в лаборатории микрокристаллических и аморфных материалов ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» разработан ряд огнеупорных и теплостойких покрытий, огнеупорных формовочных смесей, футеровочных материалов и технологий их получения для индукционных печей, что позволило повысить эффективность их работы. Разработаны ТУ ВУ 100185302.145-2007 «Материалы огнеупорные керамические для литейного производства». Оснащены и введены в эксплуатацию 3 индукционные печи, изготовлено 18 т огнеупорного керамического материала, экономия электроэнергии по ОАО «ММЗ» составила 3 – 4,5 млн. кВт·ч/год. Для теплоизоляции крышки печи, а также выполнения роли каркаса печи при замене асбестовых изделий разработан пористый материал на основе искусственного волластонита CaSiO_3 с добавками порообразователя – ферросилиция ФС 75, ФС 45. Для набивки ванны печи, повышения ее термостойкости и шлакоустойчивости в ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» разработаны набивные массы с использованием вторичных ресурсов – шлака алюминия. Такие материалы могут выдерживать резкие термоудары при открытии печи, в период запуска и остановки. С использованием вторичных ресурсов и алюминиевого шлака синтезированы огнеупорные материалы и получены штучные изделия в виде держателей электронагревателей для печей электросопротивления, а также керамические термо- и шлакоустойчивые покрытия для тепловых агрегатов литейного производства. Для продления срока службы штучных огнеупоров, защиты их от термоударов и воздействий агрессивных сред расплавов разработаны и испытаны огнеупорные покрытия, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Их отличают высокая адгезия, шлакоустойчивость и термостойкость. Такие покрытия наносятся на алюмосиликатные, магнезиальные, углеродистые огнеупоры, что позволяет снизить взаимодействие огнеупорного материала ванны с расплавом и повысить в 2 – 3 раза срок службы. Важным применением таких покрытий могут служить газовые термические закалочные печи, корундовые изделия в местах установки газовых горелок, огнеупоры в местах, подвергаемых интенсивным термическим нагрузкам (места открывания дверей печи). Использование таких СВС-покрытий на шамотные и периклазовые огнеупоры соляных электрованн печей обработки высоколегированных сталей позволяет увеличить межремонтный срок их службы в 1,5 – 3 раза.

Разработан способ одновременного рафинирования и модифицирования силумина азотсодержащими лигатурами, позволяющий измельчить α -фазу в 2 – 3 раза за счет формирования ультрадисперсных частиц нитрида алюминия, увеличить предел прочности на 5 – 10% и микротвердость на 12 – 14%. Совместная обработка расплава дисперсными частицами и ато-

марным азотом способствует упрочнению силумина. Интенсивное газообразование после разложения карбида при его соприкосновении с расплавом способствует хорошему перемешиванию частиц, их равномерному распределению в алюминиевой матрице и образованию новых упрочняющих фаз. Использование разработки позволило повысить качество отливок поршней ДВС.

Разработаны конструкция, поршневой материал на основе сплава АЛ25 и комплексная экспериментальная технология получения отливки поршня ДВС с заданной структурой и галерейным охлаждением. Использование разработки на ОАО «ММЗ» позволит создать более мощные форсированные двигатели, соответствующие экологическим требованиям международных стандартов Евро-4, Евро-5, TIER 3, обеспечить импортозамещение поршней и расширить рынок сбыта ДВС.

Разработаны и освоены уникальные для Республики Беларусь технологии металлургического передела высокочистых цветных металлов и сплавов, в том числе вторичных, основанные на сочетании вакуумной плавки, направленной кристаллизации, пластической деформации и формообразования. На опытном участке института организовано малотоннажное производство деталей и полуфабрикатов из алюминия и его сплавов, никелевых сплавов, благородных металлов. Для серийного производства ОАО «Интеграл» изготавливаются катоды-мишени различной конфигурации из алюминия А995, сплавов АК1, АК1,5, АК1М05, сплава никель-ванадий, серебра, платины. Регенерация одной платиновой мишени обеспечивает импортозамещение около 48 тыс. долл. Путем металлургической переработки лома и отходов благородных металлов (Pt, Rh, Ag) и их сплавов производятся полуфабрикаты (проволока, полоса, припой), сложнопрофильные изделия, оснастка и детали технического назначения. Налажен постоянный выпуск и поставка проката из платино-родиевых сплавов для ОАО «Полоцк-Стекловолокно» и ОАО «Завод Оптик», лабораторной посуды из платины для ПО «МТЗ», УП «БМЗ», ОАО Красносельскстройматериалы», ПРУП «Кричевцементошифер», ОАО «Керамин», стекольных заводов и др. Суммарный экономический эффект составляет более 300 млн. бел. руб./год.

Разработаны и внедрены на ОАО «Белкард» (Гродно), РУП «МТЗ» (Минск) новые виды технологической оснастки и сплавов для изготовления отливок вставок штампов и поддонов термических агрегатов. Научно-техническая новизна заключается в разработке и внедрении при изготовлении поддонов термических агрегатов жаростойкой стали с пониженным содержанием никеля и повышенной эксплуатационной стойкостью. Это позволило обеспечить экономию трудозатрат при изготовлении литейных форм, снизить себестоимость изготовления отливок вставок штампов

на 30%, уменьшить содержание никеля при изготовлении поддонов для безмуфельных термических агрегатов (суммарная экономия составила свыше 200 млн. бел. руб. в год), сократить вредные выбросы в атмосферу в 1,5 раза.

Разработаны экономнолегированный износостойкий сплав ЧХ22Г, превосходящий традиционные сплавы по литейным и механическим свойствам, и технология изготовления из него отливок насосного оборудования, которые освоены в производстве на ОАО «Бобруйский машиностроительный завод». Успешно прошли эксплуатационные испытания отливок из нового сплава на ряде предприятий республики. В отличие от серийного сплава ИЧХ28Н2 новый сплав при твердости 60HRC имеет хорошую обрабатываемость, что обусловлено особенностями его структуры. В результате замены никеля на марганец и уменьшения содержания хрома себестоимость отливок для насосов ГРАТ 350/40, ГРАТ85/40, ГРАТ 170/40 снизилась на 14 – 20% в зависимости от их массы и сложности. Дополнительный экономический эффект образуется при механической обработке отливок и в процессе их эксплуатации. Разработаны и зарегистрированы технические условия на отливки из чугуна ЧХ22Г, проведены их квалификационные испытания.

Исследованы особенности структурообразования деформированного чугуна и технологические режимы получения из него деталей авто- и сельхозмашиностроения, что позволило улучшить триботехнические характеристики деталей посевной техники, срок службы которых составлял менее одного сезона, и осуществить импортозамещение деталей. Для ОАО «Лидагропроммаш» (Лида) концерна «Белагромаш» Министерства промышленности Республики Беларусь были изготовлены опытные партии втулок оси сочленения и проведены сравнительные полевые испытания (одновременно на одной сеялке СТВ-8КУ работали серийные и экспериментальные детали), показавшие трехкратное увеличение срока службы. Для опытного завода «Неман» (Лида) изготовлены втулки оси сцепления и оси педали тормоза. Эксплуатационные испытания автобусов с деталями из чугуна показали, что он не уступает бронзе по триботехническим характеристикам и дешевле ее на 40%. Первые экземпляры автобусов с этими деталями (выпуска 2007 г.) прошли свыше 350 тыс. км без рекламаций. Сейчас в Беларуси эксплуатируется 22 пассажирских автобуса, оснащенных деталями из деформированного чугуна. Решена задача импортозамещения – полная замена бронзового прутка Бр10Ц2 на высокопрочный деформированный чугун производства Республики Беларусь.

Разработаны технологические процессы объемного и поверхностного термического упрочнения титановых и стальных элементов бронезилов с целью повышения защитных характеристик и снижения веса. Процесс поверхностного упрочнения титановых и стальных защитных элементов обеспечивает получение градиентной структуры, обеспечивающей повышение уровня баллистической защиты на 10 – 15%. Разработана струк-

тура многослойных броневых панелей, предназначенная для бронирования кузовов транспортных средств специального назначения, которая обеспечивает противопульную и противоосколочную защиту.

Разработаны лазерные и плазменные технологические процессы упрочнения рабочих поверхностей плоских и сферических дисков лушительных и борон, ножей к кормоуборочному комбайну «JAGUAR 840», ножей кукурузной жатки ПКС-02 и ножей для дообрезки ботвы свеклоуборочного комбайна КСН-6. Модифицирование поверхности осуществлялось путем нанесения порошка износостойкого состава, содержащего карбиды хрома, вольфрама, бориды и другие соединения шликерным методом перед обработкой высококонцентрированными потоками энергии. Применение наукоемких и экологически чистых технологий позволило получить образцы деталей нового поколения. Отличительными сторонами этих изделий является мелкозернистое строение, высокие твердость, прочность, ударная вязкость, высокая сопротивляемость ударно-абразивному изнашиванию. Рабочая часть деталей обладает высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами: твердостью – 55...65 HRC; ударной вязкостью – 0,6...0,8 МДж/м²; глубина закаленного слоя составляет до 2,5...3 мм; структура в поперечном сечении характеризуется градиентным строением (поверхностный слой – мартенсит, сердцевина – троостит). Размер в поперечном сечении мартенситных пластин составляет 50...100 нм, размер фасеток отдельных пластин мартенсита – 20...80 нм. Проведенные полевые испытания опытных образцов указанных типов деталей показали достижение уровня мировых аналогов, соответствие и превышение нормативов технических заданий по износостойкости в 1,6...2,0 раза. Освоение отечественного производства упрочненных деталей позволит ежегодно экономить валютные средства на сумму свыше 17,0 млрд. бел. руб.

В Научном инженерном центре «Плазмотек» разработана технология получения алмазоподобных углеродных (АПУ) покрытий, из углеродной плазмы импульсного катодно-дугового разряда в вакууме. Технология позволяет получать покрытия толщиной до 2 мкм с высокой адгезией без нагревания подложек из углеродистой и инструментальной стали, алюминия и его сплавов, меди, стекла, полимеров и других материалов.

По данным атомной силовой микроскопии среднеквадратичная шероховатость АПУ покрытий на полированном кремнии не превышает нескольких нанометров. Плотность покрытий составляет 2,9...3,2 г/см³, твердость – до VN 8500, модуль упругости – порядка 900 ГПа, износостойкость – 10⁻⁷...10⁻⁸ мм³/Н·м. Они имеют низкий коэффициент трения в паре со сталью (менее чем 0,15). Удельное электрическое сопротивление материала пленок составляет 10⁶ Ом·см, показатель преломления для длины волны 530 нм лежит в пределах 2,48...2,51. Процесс нанесения покрытий реали-

зуется с использованием промышленного вакуумного оборудования с импульсным катодно-дуговым источником углеродной плазмы, который имеет оригинальную запатентованную конструкцию системы поджига плазмы в вакууме. Максимальная покрываемая поверхность составляет около 5000 см² с неоднородностью покрытия менее 10%. Полученные АПУ материалы нашли промышленное применение в качестве упрочняющих износостойких покрытий изделий машиностроения и инструментальной промышленности. Высокую эффективность АПУ покрытия показали при их использовании в плунжерных парах и поршнях дизельных двигателей, деталях распределителей, при этом возможно не только увеличение рабочего ресурса изделий в 2...3 раза, но и восстановление изношенных частей плунжеров. Срок службы микросверл и фрезы из твердосплава для обработки печатных плат увеличивается в 1,8...2 раза при существенном улучшении качества обработки. Особо эффективным оказалось применение АПУ покрытий для мерительного инструмента (плитки Иогансона, калибры-пробки, концевые меры). Покрытые ими измерительные инструменты и плитки, и плитки Иогансона увеличивают срок службы в 2...2,5 раза. Алмазоподобные углеродные материалы нашли применение в качестве износостойких химически инертных покрытий литейных форм пластмассы, а также производства магнитной керамики под давлением. В случае нанесения покрытий на подвижные части литейных форм, работающих в условиях сухого трения, достигается двойной эффект – предотвращается налипание пластмассы на форму и снижается коэффициент трения и износ трибопар. Путем нанесения АПУ покрытий на текстурированные полимерные ленты разработана технология получения абразивного материала, предназначенного для суперфинишной обработки деталей компьютерной техники и оптики, запатентованная в 5 европейских странах, США, Канаде и Китае. Проводятся успешные исследования по использованию АПУ тонких пленок в качестве активных элементов термостабильных малошумящих резисторов номиналом в несколько гигаом. Алмазоподобные углеродные пленки медикобиологического назначения нашли применение в качестве гемосовместимых тромборезистентных покрытий корпусов искусственных клапанов сердца и ортопедических протезов. Для клинических нужд выпущено несколько тысяч таких изделий. В последние годы уделяется большое внимание разработке нового комбинированного PVD-CVD метода нанесения покрытий, имеющего ряд преимуществ по сравнению с традиционными физическими и химическими методами осаждения, в частности, гибкое управление структурой покрытий и типом химических связей между атомами углерода, высокую производительность процесса нанесения, многократное снижение внутренних напряжений, существенное увеличение равномерности покрытий,

МОБИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО С ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Н. Н. Попок, В. А. Данилов

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Изложена концепция мобильной реорганизации и развития машиностроительного производства, предложены пути интенсификации технологий формообразования. Обобщены результаты исследований кафедры в этой области и опыт их промышленной реализации.

Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроения неразрывно связано с освоением новых изделий и технологий. При этом актуальным является решение проблемы эффективной интеграции новых изделий и технологий с действующим производством и интенсификация механической обработки заготовок как имеющей наибольшее распространение в машиностроении.

Согласно предложенной концепции мобильной реорганизации и развития машиностроительного производства [1], оценка его технологических возможностей осуществляется, в первую очередь, на основе сравнения степени сложности проектирования и изготовления базовых изделий (которые ранее серийно выпускались на действующем предприятии и определяли его технологический базис) и нового изделия (которое принимается к освоению в производстве), причем по критерию наибольшего применения (частоты встречи) типовых узлов и деталей изделий. То есть, по существу, на этом этапе мобильной реорганизации производства выбирается изделие, наиболее рациональное для технологического базиса данного предприятия. Разработаны методики экспресс-оценки степени сложности изделий и степени мобильности машиностроительного производства.

Собственно мобильное производство – это производство, позволяющее быстро и с минимальными затратами перестраиваться на выпуск новых изделий. Ключевую роль в этой перестройке играют возможности механической обработки, металлорежущих станков и технологической оснастки, которые призваны обеспечить мобильность производства и интенсифицировать его.

Анализ тенденций современного развития механической обработки поверхностей деталей, станков и технологической оснастки показывает, что для повышения конкурентоспособности выпускаемых изделий широко применяется объединение технологий снятия припуска как различных операций механической обработки материала, так и согласованных между со-

бой термической, химической и электроэрозионной обработок; дальнейшее расширение номенклатуры оборудования для комплексной обработки на одном станке все более сложных деталей и создание многофункциональных станков; широкое распространение модульного принципа построения технологической оснастки и станков. Модульный принцип предусматривает использование в технике унифицированных взаимозаменяемых модулей, из которых могут создаваться, например, различные компоновки металлорежущих станков, приспособлений, режущих инструментов. Этот принцип также используется в модульных технологиях, при модульном проектировании объектов и процессов, в мобильном производстве.

На кафедре технологии и оборудования машиностроительного производства более 35 лет ведется работа в этом направлении. Ее результатом являются новое технологическое оборудование и оснастка, выпуск которых освоен машиностроительными предприятиями. В частности, разработана многофункциональная технологическая оснастка (режущий инструмент), позволяющая на основе унифицированных резцового блока и составляющих модулей создавать инструмент, обеспечивающий обработку различных конструктивных элементов и поверхностей деталей. Экономическая целесообразность такого инструмента обусловлена снижением затрат на проектирование, изготовление и эксплуатацию в производстве.

Проводимые исследования направлены на интенсификацию процессов обработки. Проблема интенсификации рассматривается на основе системного подхода и предложенной структурной модели способа обработки, в соответствии с которой его основными компонентами являются схема формообразования поверхности, технологический метод обработки и формообразующая система, обеспечивающая необходимый поток информации, материалов и энергии [2]. Такая структура способа обработки обуславливает необходимость комплексного подхода к рассматриваемой проблеме путем оптимизации как процессов формообразования и резания, так и средств их реализации. Поэтому общими путями интенсификации способов формообразования являются:

- синтез рациональной схемы формообразования поверхности и распределение функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами;
- разработка или выбор эффективного метода обработки;
- оптимизация структуры формообразующих компонентов обрабатывающей системы.

Определены и обоснованы основные принципы синтеза рациональной кинематики формообразования, включающие:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет ис-

ключения геометрическим или кинематическим методами реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными;

- совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;

- введение движений для стабилизации условий резания, управления точностью формообразования, схемой или условиями резания;

- задание на основе математического моделирования рационального сочетания скоростей элементарных движений для стабилизации скорости исполнительного движения или управления ею по требуемому закону;

- рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами станка для повышения его универсальности и оптимизации компоновки.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования прогрессивных методов обработки (фрезоточение, ротационное точение), созданы соответствующие промышленные установки, что позволило интенсифицировать процессы обработки труднообрабатываемых материалов (титановых сплавов с альфированным слоем, чугуновых отливок с отбеленным слоем, углеграфита и др.). Этому способствовало и применение результатов исследований по ионно-лучевой обработке.

На уровне изобретений разработаны кинематические структуры, компоновки и системы управления токарных, зубодолбежных, зубофрезерных, зубошвинговальных, рейкофрезерных и других станков.

На основе изложенного подхода созданы прогрессивные способы обработки винтовых поверхностей лопастей гребных винтов и роторов винтовых насосов, некруглых зубчатых колес и колес с бочкообразными зубьями, изделий с плоским зубчатым контуром, некруглых цилиндрических поверхностей моментопередающих соединений и др. Они положены в основу модернизированных и новых металлорежущих станков. Так, Витебским станкостроительным заводом «Вистан» с участием Полоцкого государственного университета по заданиям научно-технических программ и заказам промышленных предприятий созданы широкоуниверсальный станок модели ВС 50 и его инструментальное оснащение для обработки профильных и прерывистых поверхностей деталей машин, специальные станки моделей ВС 50-9601 и ВС 30П-9253 и инструменты к ним для нарезания плоских зубчатых контуров индукторов АБС автомобилей. На кафедре по заказам предприятий освоено производство закупаемых ранее за рубежом роторов одновинтовых насосов.

Созданные станки и инструменты заменяют дорогостоящее зарубежное оборудование и позволяют в 2,5 – 6 раз повысить производительность обработки сложнопрофильных изделий по сравнению с применяемой технологией.

Полученные результаты носят общий характер и могут быть использованы для анализа и синтеза способов формообразования различных типов поверхностей при создании станочного оборудования и режущих инструментов для их обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н. Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н. Н. Попок. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – 396 с.
2. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.

УДК 621.9.048.7: 533.9.07

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАСТЕР ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПЛАЗМЫ

В. Т. Барченко, Л. П. Вересов, О. Л. Вересов
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

Рассматривается структура построения опытно-лабораторной установки, позволяющей в едином технологическом цикле последовательно проводить несколько технологических операций без разгерметизации технологической камеры. Приводится описание основных технологических модулей, установленных в ней.

Модификация поверхности конструкционных материалов в различных отраслях машиностроения пучково-плазменными методами с целью повышения их функциональных характеристик, таких как твердость, износостойкость, жаропрочность, жаростойкость, коррозионная стойкость и др., сегодня является одним из наиболее перспективных направлений применения ионно-плазменных технологий.

Очистка поверхности, ее легирование методом ионной имплантации или нанесение тонких пленок ионно-плазменными методами, а также термообработка электронным пучком в едином технологическом цикле без разгерметизации вакуумной камеры представляется весьма эффективным технологическим процессом.

В Сухумском физико-техническом институте (СФТИ) при консультативной помощи сотрудников кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» построена электрофизическая установка, предназна-

ченная для изучения процессов при разработке новых методик воздействия на поверхность материалов потоками заряженных частиц и плазмы и разработки конкретных технологических процессов на базе ионно-плазменных технологий. Схема установки показана на рисунке 1.

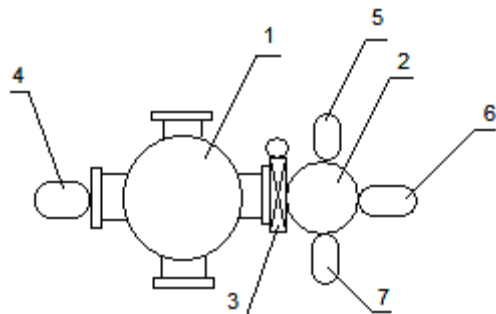


Рис. 1. Схема установки Т-50 (вид сверху): 1 – первая вакуумная камера; 2 – вторая вакуумная камера; 3 – шиберный затвор; 4 – ионный источник; 5 – плазменный источник (дуговой или магнетронный); 6 – электронный источник; 7 – источник быстрых нейтронов

Для установки разработаны и установлены ионный источник дуоплазматронного типа с холодным магнетронным катодом [1, 2] и источник на базе газоразрядной камеры типа Пеннинга с холодным катодом [3, 4]. Первый формирует импульсные пучки ионов газа, второй – как импульсные, так и непрерывные многокомпонентные пучки ионов газа и металла. Благодаря применению холодных катодов оба источника могут работать с агрессивными плазмообразующими газами, в том числе и с кислородом. Оба типа источников имеют внутрикамерное исполнение, что упрощает их конструкцию. Для экстракции и первичного формирования пучка применена система ускорения – замедления. Для финишной фокусировки пучка на обрабатываемом изделии используется одиночная электростатическая линза, работающая в режиме торможения. Оба источника являются новыми разработками.

Внешний вид ионных источников показан на рисунках 2 и 3.



Рис. 2. Источник газовых ионов

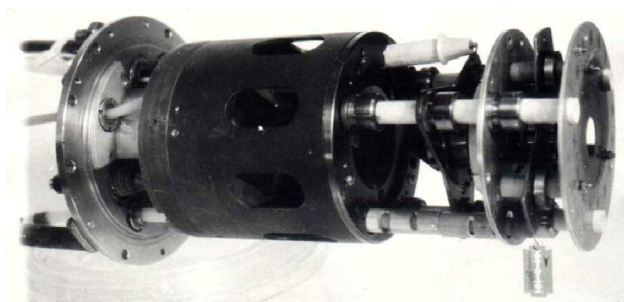


Рис. 3. Источник многокомпонентных ионных пучков

В качестве основных особенностей ионного источника с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы можно отметить:

- применение цилиндрического обращенного многокамерного магнетронного катода;

– отсутствие промежуточного контрагирующего электрода и формирование неоднородного сжимающего магнитного поля у эмиссионного отверстия с помощью постоянных кольцевых магнитов;

– применение конусного экспандера с плавно изменяемым углом раствора, в который помещена конусная диафрагма.

В ионном источнике с холодным катодом второго типа рабочее вещество образуется с помощью ионного распыления катода-мишени. Его главная особенность заключается в том, что система отбора и формирования пучка является неотъемлемой частью генератора плазмы. Сравнение конструкции предложенного ионного источника с конструкцией РІG-источника ионов с продольным извлечением показывает, что основное отличие данной конструкции от прототипа заключается в отсутствии антикатода. В рассматриваемой конструкции антикатод является виртуальным. Его функции выполняет поверхность в промежутке «анод – ускоряющий электрод (экстрактор)», имеющая потенциал катода газоразрядной камеры. От этой поверхности происходит отражение наиболее быстрых электронов, выбитых из катода и не успевающих отдать энергию, приобретенную в катодном слое. В разработанном источнике эмиссионная поверхность не «привязана» к какому-либо электроду, а располагается в промежутке «анод – экстрактор».

Указанные особенности позволяют использовать только один высоковольтный источник питания как для зажигания и поддержания разряда, так и для извлечения ионного пучка, что делает предлагаемый ионный источник одним из самых экономичных по энергопотреблению.

Для финишной ионной очистки поверхности деталей предусмотрено применение плазменного ускорителя с анодным слоем или источника быстрых нейтралов, описанного в работе [5]. Его внешний вид показан на рисунке 4.

Источник электронов построен на базе генератора плазмы с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы.

Для нанесения тонких пленок в установке предусмотрена возможность установки как вакуумно-дугового испарителя, так и магнетронной распылительной системы.

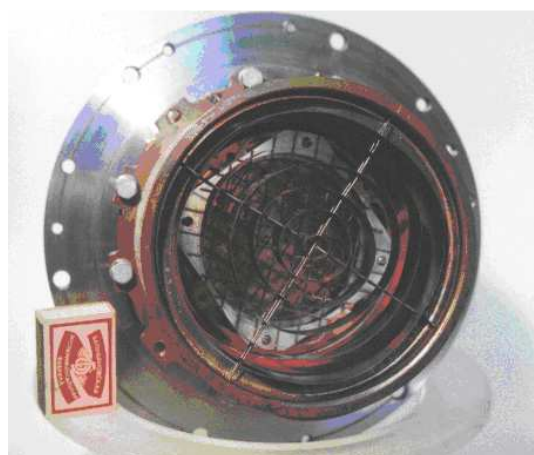


Рис. 4. Вид источника быстрых нейтралов

ЛИТЕРАТУРА

1. Вересов, Л. П. Ионный источник с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы / Л. П. Вересов, О. Л. Вересов // ЖТФ. – 2003. – Т. 73. – Вып. 10. – С. 122 – 129.
2. Вересов, Л. П. Источник ионов водорода с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы / Л. П. Вересов, О. Л. Вересов, А. Ф. Чачаков // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. – Вып. 1. – С. 132 – 135.
3. Вересов, Л. П. Исследование ионного источника, предназначенного для пучковых технологий / Л. П. Вересов, О. Л. Вересов, П. А. Литвинов // ЖТФ. – 2000. – Т. 70. – Вып. 4. – С. 111 – 117.
4. Barchenko, V. T. Plasma Ion Source for Modification of Materials / V. T. Barchenko, L. P. Veresov, O. L. Veresov and S. V. Grigorenko // 5th Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2000. – P. 220 – 223.
5. Барченко В. Т. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / В. Т. Барченко, Ю. А. Быстров, Е. А. Колгин. – СПб. : Энергоатомиздат, 2001.

УДК 621.338.45

НЕОБХОДИМОСТЬ ОЦЕНКИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В. В. Богатырева

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Проанализирована необходимость разработки единой системы оценки человеческого капитала, позволяющей достоверно оценить стоимость организации и разработать концептуальные подходы к управлению человеческим капиталом.

Важным фактором, определяющим уровень национального хозяйства, является его экономический потенциал, основу которого составляет человеческий капитал, во многом определяющий способность государства действовать в мировой экономической системе. Исследование человеческого капитала как важного актива отдельно взятой организации и национальной экономики в целом имеет большое теоретико-методологическое и практическое значение. В условиях применения единой системы финансовых расчетов для всех организаций становится очевидным, что назрела необходимость разработки единой системы оценки человеческого капитала, которая позволила бы сформировать достоверную стоимость организации и разработать концептуальные подходы к управлению человеческим капиталом.

В современных условиях экономисты делали попытку оценить производительные силы общества в целом и инвестиции в человеческий капитал, но до сих пор эти исследования не носят достаточно комплексного,

системного характера. Не умаляя важности проведенных исследований, отметим, что остались нерешенными следующие задачи: нет единой всеобъемлющей методологии оценки человеческого капитала; не определены источники финансирования человеческого капитала на каждом этапе становления и функционирования; не раскрыта взаимосвязь между уровнями управления человеческим капиталом (привлечение человеческих ресурсов, их поддержки, развития и удержания) в рамках современных теорий менеджмента; нет приемлемого инструментария управления человеческим капиталом в условиях динамического процесса изменений внешней и внутренней среды с учетом факторов риска и неопределенности.

Оценка человеческого капитала и разработка комплекса мероприятий по повышению эффективности его управления приобретают особую практическую ценность и значимость для предприятий машиностроительной. Это обусловлено некоторыми обстоятельствами.

Во-первых, в современных условиях машиностроительная отрасль занимает второе место по значимости среди ведущих отраслей национальной экономики, обеспечив в 2010 году 21 % объема всей промышленной продукции страны. В этом же году наибольшее увеличение объемов промышленного производства в отраслевом разрезе отмечено именно в машиностроении и металлообработке (+16,7 %), а рентабельность реализованной продукции в машиностроении за 2010 год составила 11,6 %, в то время как в промышленности в целом этот показатель достиг уровня 9,9 %. Данные факты являются весомым основанием признать сравнительно высокую устойчивость машиностроительной отрасли к экономическому спаду.

При рассмотрении региона Витебской области, то в региональной программе инновационного и инвестиционного развития Витебской области на 2011 – 2015 годы приоритетным направлением инновационного развития обозначено развитие наукоемких производств, что усиливает практическую ценность и значимость разработки комплекса мероприятий для повышения эффективности деятельности предприятий на примере машиностроительной отрасли как одной из ведущих отраслей национальной экономики.

Во-вторых, машиностроительный комплекс Беларуси является ведущим не только по стоимости выпускаемой продукции, но и по численности работающих. От уровня развития отрасли зависит механизация и автоматизация всего национального промышленного производства, что в условиях становления экономики инновационного типа предопределило прямую зависимость темпов развития наукоемких и высокотехнологичных подотраслей и производств от уровня обеспечения высококвалифицированными кадрами машиностроительной отрасли. В условиях инновационной экономики разработка и внедрение инноваций на предприятиях маши-

ностроительной отрасли представляется особенно актуальным. В свою очередь, разработка и внедрение инноваций выступают продуктом человеческого труда, а эффективность освоения инноваций всецело зависит от образованности, профессионализма, способностей, накопленного запаса знаний и навыков работников. Более того, существенно возрастает значение человеческого капитала как решающего фактора, предопределяющего эффективность инновационных мероприятий на предприятии. Важным критерием повышения эффективности инновационной деятельности становится увеличение расходов субъектов хозяйствования на формирование, развитие, содержание и сохранение человеческого капитала организации. В процессе создания инновации субъект хозяйствования несет определенные затраты, которые накапливаются по этапам становления инновационного продукта и участвуют в формировании его стоимости. Так как человеческий капитал принимает прямое участие в создании инновационного продукта, то представляется целесообразным затраты на формирование, развитие, содержание и сохранение человеческого капитала включать в состав затрат на инновации, которые участвуют в формировании стоимости инновационного продукта. Проведение оценки человеческого капитала обеспечит информационную базу, позволяющую учитывать затраты на формирование, развитие, содержание и сохранение человеческого капитала как одну из необходимых статей затрат при формировании стоимости инновационного продукта и обеспечивающую возможность достоверной стоимостной оценки инноваций.

В-третьих, эффективное управление человеческим капиталом предприятий, в том числе машиностроительной отрасли, приводит к росту доходов населения. В то же время увеличение доходов способствует росту заинтересованности работников в дальнейшем инвестировании в человеческий капитал. Следовательно, доходы существующих домашних хозяйств, с одной стороны, обусловлены размером обладаемого человеческого капитала, а с другой стороны, являются одним из определяющих факторов в развитии человеческого капитала. Поэтому эффективные меры воздействия, направленные на увеличение доходов домашних хозяйств, будут способствовать развитию человеческого капитала, который является основой экономического роста и обеспечивает эффективность использования всех видов производственных ресурсов отрасли. Так как инновационная экономика предъявляет более высокие требования к качеству человеческого капитала, что, в свою очередь, требует совершенствования методологических подходов к его оценке, то одним из направлений таких исследований является измерение производственной ценности работника. Конечная производственная ценность работников определяется уровнем их трудовых доходов, которые в настоящий момент неравномерно распределяются по от-

раслям экономики. Учет стоимости человеческого капитала в формировании стоимости продукции будет способствовать более объективной оценке затрат труда работников различных отраслей экономики и повышению их соответствия заработной плате отдельных работников.

На этой основе представляется актуальной разработка комплекса мероприятий по повышению эффективности управления человеческим капиталом, позволяющего активизировать процесс вовлечения финансовых активов работников в финансирование затрат на человеческий капитал. Это позволит предприятиям достигнуть более высокого уровня человеческого капитала при минимальных дополнительных затратах собственных средств. С другой стороны, достигнутый эффект будет двусторонним за счет того, что увеличение уровня человеческого капитала приведет к росту трудовых доходов как работников, так и предприятия в целом.

УДК 621.9.02-182.66-752

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ПЛАНЕТАРНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

В. А. Косарев

Московский государственный технологический университет «Станкин»

Предложена модель в виде гиперграфа, на основе которой определены задачи, связанные с перспективными направлениями разработок и исследований процесса формообразования отверстий планетарным движением инструмента.

С развитием гибких производственных систем в машиностроении особый интерес вызывают методы обработки сложных поверхностей на станках с ЧПУ. Формообразование поверхностей в отверстиях планетарным движением инструмента является одним из таких методов [1].

Процесс формообразования (ПФ) поверхностей в отверстиях планетарным движением инструмента следует рассматривать в виде системы отдельных, функционально связанных между собой, конструктивных и технологических элементов, наглядно представленной в виде ориентированного гиперграфа Γ_{163} (рис. 1).

При разработке модели формирования ПФ в виде гиперграфа за основу была принята структура системы «Технолог» [2, 3]. Модель M_1 в виде гиперграфа Γ_{163} (Т, Е) позволяет более наглядно представить структуру формирования ПФ и долю элементов объектного обеспечения, у которого каждое ребро $l_i \in E$ представляет некоторое подмножество вершин $l_i \subseteq T$.

Каждое ребро l_{11} является множеством элементов, которые представляют собой последовательные этапы работы системы проектирования ПФ: t_1 (П) характеризует обрабатываемую поверхность, t_2 (ДЛ) определяет глубину обрабатываемого отверстия, t_3 (МАТ) определяет характеристику обрабатываемого материала, t_4 (МЕТ) – выбор метода обработки, t_5 (ОБ) – вид образующей поверхности инструмента, t_6 (СД) – характер сдвига образующей инструмента при обработке, t_7 (ИН) – вид инструмента, t_8 (МКР) – определяет доминирующие нагрузки при формообразовании, t_9 (СТ) – доминирующий параметр, определяющий стойкость инструмента, t_{10} (ПК) – параметр качества обрабатываемой поверхности.

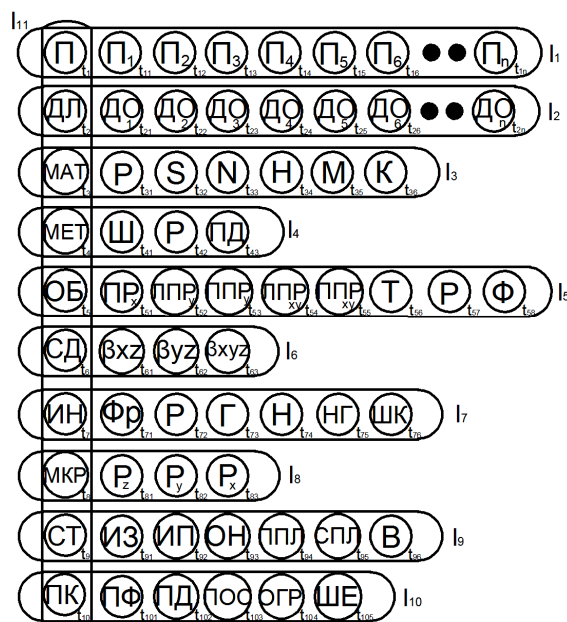


Рис. 1. Гиперграф Γ_{t63} ПФ внутренней резьбы

Каждое ребро l_i характеризует множество вариантов свойств, характеристик рассматриваемого элемента или особенности его технологических условий ПФ. Модель в виде гиперграфа Γ_{t63} обладает наглядностью и сравнительной простотой построения, но выполнять преобразования на данной модели сложно. Введение дополнительных дуг (связи) в гиперграфе образует зоны с транзитивным замыканием, что позволяет по данному графу построить матрицу циклов. Формирование циклов зависит от поставленных технологических задач. Кроме того, возможно построение маршрутов графа, моделирующих последовательное направление разработок и исследований с целью расширения технологических возможностей ПФ. С помощью построенной матрицы описаны циклы по решению задач, связанных с перспективными направлениями разработок и исследований ПФ-отверстий планетарным движением инструмента.

Выявлено, что одним из факторов, ограничивающего технологические возможности ПФ, является недостаточная жесткость инструмента, так

как ему приходится работать в ограниченном пространстве. Для решения данной проблемы разработана модель M_2 .

$$I_{n1} = \{t_{16} (t_{28}) t_{31} t_{32} t_{42} t_{54} t_{55} (t_{63}) (t_{71}) (t_{81}) (t_{96}) (t_{102})\}.$$

Анализ конструкции инструмента, предназначенного для обработки резбовых поверхностей данным методом, показал, что одной из причин износа инструмента является повышенная вибрация. Исследования в этом направлении определяет модель M_3 .

$$I_{n2} = \{t_{16} (t_{25}) t_{31} t_{42} t_{54} t_{55} t_{63} (t_{71}) (t_{72}) (t_{82}) (t_{96}) (t_{95}) (t_{104}) (t_{105})\}$$

Выбор третьего направления исследования был предопределен тем, что при наличии малых подач и достаточно высокой скорости обработки данным методом есть все предпосылки для формообразования внутренней резьбы методом пластической деформации. Это выражается следующей моделью M_4 .

$$I_{n3} = \{t_{16} t_{22} (t_{33}) (t_{43}) t_{55} t_{54} t_{63} (t_{74}) (t_{75}) (t_{82}) (t_{101}) (t_{102})\}$$

Выделенные в скобках вершины t_n в моделях M_2 , M_3 , M_4 определяют направления либо новых разработок конструкций инструмента, либо исследования в области изменения параметров ПФ. В частности, для реализации первой модели M_2 разработан инструмент с передней направляющей (патент на изобретение № 2300449, 2007 г.). Для реализации второй модели M_3 предложена сборная твердосплавная пластинка с демпфирующими свойствами (патент на изобретение № 2323067, 2006 г.). Для реализации третьей модели M_4 предлагается способ и инструмент пластического деформирования (патент на изобретение № 2373017, 2009 г.)

Таким образом, при имеющихся конструктивных решениях по каждому направлению для реализации в дальнейшем поставленных научных задач и разработок ПФ-отверстий планетарным движением инструмента появляется возможность определения элементов, параметров и их взаимосвязей с выделенными вершинами гиперграфа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Локтев, Д. А. Обработка резьбы (обзор современных методов и конструкций инструментов) / Д. А. Локтев – М. : Машиностроение, 2001. – 48 с.
2. Горанский, Г. К. Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства / Г. К. Горанский, Э. И. Бендерова. – М. : Машиностроение, 1981. – 456 с.
3. Гречишников, В. А. Моделирование систем инструментального обеспечения автоматизированных производств / В. А. Гречишников. – М. : Машиностроение, 1988. – 60 с.

ПОСТРОЕНИЕ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА МАЛЫХ ИННОВАЦИОННЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. И. Аверченков, А. В. Аверченков

Брянский государственный технический университет

В статье рассматриваются вопросы построения единого информационного пространства (ЕИП) малых инновационных машиностроительных предприятий, показаны основные компоненты ЕИП и необходимый набор автоматизированных систем.

В современных российских условиях в машиностроительной отрасли сложилась ситуация, при которой большинство крупных промышленных предприятий, успешно существовавших до начала девяностых годов, оказались не в состоянии выживать в конкурентной среде. Среди причин неудач необходимо особо выделить тотальное устаревание технической базы, необходимость содержать ряд малоэффективных подразделений, длительный цикл подготовки производства новых изделий, отсутствие крупных оборотных средств, высокий средний возраст инженерных кадров.

В настоящее время из крупных машиностроительных предприятий наилучшим образом чувствуют себя предприятия, работающие на оборонные отрасли со стабильными государственными заказами и редко изменяющимся номенклатурным рядом продукции.

В связи с этим особое место стали занимать активно создаваемые в последующие года машиностроительные малые инновационные предприятия (МИП), которые даже в кризисных условиях имели возможность успешно конкурировать на рынке, развиваться и приносить прибыль.

Информационное обеспечение деятельности МИП в машиностроении потребовало разработки новых подходов к формированию единого информационного пространства (ЕИП). Используемые автоматизированные системы и модули получают информацию и взаимодействуют между собой через ЕИП, также через ЕИП осуществляется взаимодействие с внешними агентами (рис. 1) [1].

На рисунке 1 пронумерованы связи автоматизированных систем с базой знаний и единым информационным пространством:

1. CAD/CAM/CAE-системы являются базовым звеном автоматизации подготовки производства МИП. Они используют данные большинства вспомогательных систем и хранят их в базе знаний МИП.

2. САПР ТП получают из БЗ конструкторскую документацию на изделия в виде чертежей и КТМ деталей. В БЗ передаются разработанные технологические процессы изготовления деталей.

3. Системы автоматизации документооборота и управления производством управляют информационными потоками в ЕИП МИП, решают складские, логистические, экономические, бухгалтерские и ряд других задач.

4. Автоматизированные системы подбора металлообрабатывающего инструмента на основе данных из БЗ подготавливают рекомендации по выбору инструмента и передают их через ЕИП в САМ-системы и САПР ТП.

5. Автоматизированные системы интеграции CAD и САПР ТП на основе 3D-модели и конструкторского чертежа из БЗ распознают и составляют конструкторско-технологическую модель (КТМ) деталей для автоматизированного проектирования на их основе технологических процессов в САПР ТП.

6. Автоматизированные системы выбора стратегий обработки на основе данных из БЗ подготавливают рекомендации для САМ-систем по коррекции стратегий обработки с целью снижения машинного времени с минимальными затратами.

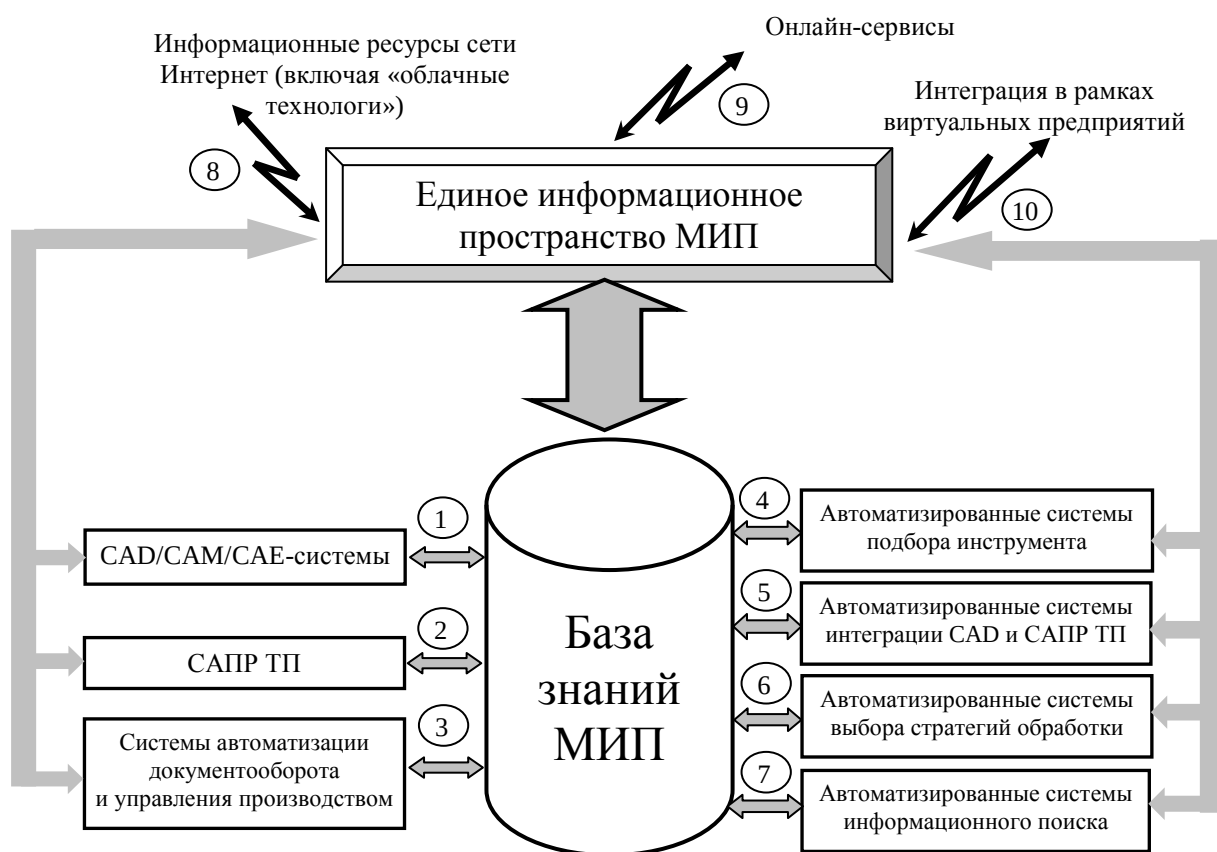


Рис. 1. Движение информационных потоков в деятельности МИП в машиностроении

7. Автоматизированная система информационного поиска производит мониторинг глобальных сети на предмет поиска новой информации и технологий в области конструкторско-технологической информации.

8. Доступ к информационным и вычислительным («облачные технологии») ресурсам сети Интернет обеспечивает актуализацию информационного наполнения БЗ и ряд других общеизвестных возможностей.

9. Доступ к онлайн-сервисам открывает для МИП ряд специфических возможностей, таких как онлайн-заказ материалов и инструмента, коллективный доступ у научному и технологическому оборудованию и пр.

10. ЕИП МИП может быть связано через глобальные сети с ЕИП других МИП или крупных предприятий в рамках виртуальных предприятий. В этом случае в ЕИП связанных предприятий начинают действовать некоторые общие установленные правила и закономерности.

Правильно построенное ЕИП машиностроительных МИП позволит выпускать инновационную продукцию с требуемым качеством и в минимальные сроки, а также оперативно взаимодействовать с партнерами в рамках так называемых «виртуальных предприятий».

В Брянском государственном техническом университете на основе Федерального закона РФ № 217-ФЗ от 02.09.11 создано малое инновационное предприятие ООО «Инновационный центр высоких технологий в машиностроении», в котором реализованы рассмотренные подходы и методики [1]. Ряд автоматизированных систем, применяемых на предприятии, создан в результате научных исследований преподавателей и ученых БГТУ, и они внесены в качестве интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия. К ним относятся автоматизированная система интеграции САД и САПР ТП, автоматизированная система подбора инструмента, автоматизированная система выбора стратегий обработки, автоматизированная система мониторинга информации в сети Интернет и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверченков, В. И. Инновационные центры технических университетов как основа взаимодействия науки, образования и промышленных предприятий в сфере применения высоких технологий в машиностроении. Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки / В. И. Аверченков, А. В. Аверченков // Тезисы докл. междун. науч.-техн. конф., Минск, 12 – 13 апреля 2011 г. / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2011. – С. 18 – 19.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ

В. В. Рудый

Белорусский автомобильный завод, Минск

В. Е. Антонюк

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Э. М. Дечко

Белорусский национальный технический университет, Минск

Предложена технология изготовления дисков с использованием динамической стабилизации для устранения отклонений от плоскостности рабочих поверхностей дисков, что связано с технологической наследственностью при их изготовлении: после вырезки заготовок из листа, после предварительного и после окончательного шлифования.

В процессе изготовления фрикционных дисков возникают различные виды деформаций от сил резания, от сил зажима, от перепада температур, от структурных изменений и т.д. Для исключения этих явлений применяются различные виды правки и снятия остаточных напряжений.

Наиболее распространенным методом правки является деформирование статической нагрузкой в направлении, противоположном возникшему искажению. Для правки деталей типа дисков и колец широко применяются роликовые листопрямляющие машины. Недостатком этого метода является то, что при деформировании пластическим изгибом создаются остаточные напряжения; спустя некоторое время, а также при последующей обработке шлифованием правленая деталь снова приобретает прежнюю форму. Это явление известно как технологическая наследственность и с целью устранения отрицательного действия технологической наследственности рекомендуется изыскивать технологические средства, которые могли бы ослабить или нейтрализовать действие этих факторов в процессе стадийного шлифования [1].

Использование динамической стабилизации для повышения точности дисков показало существенные преимущества и возможности по сравнению с правкой на роликовых машинах [2, 3]. Однако использование динамической стабилизации как окончательной операции при изготовлении дисков не всегда дает значительное повышение точности.

На рисунке 1 представлена динамика изменения точности на основных технологических операциях изготовления дисков по отклонению от плоскостности. На этих графиках прослеживается возникновение повышенных отклонений на всех операциях технологического процесса изго-

товления дисков, но наиболее существенные отклонения возникают после операций шлифования. Полученные результаты совпадают с выводами, приведенными в работе П. И. Ящерицына [1], и подтверждают, что в процессе стадийного шлифования вследствие технологической наследственности возникают и усиливаются остаточные напряжения.



Рис. 1. Достижимая точность изготовления дисков 7555В-3502595-10 по действующему технологическому процессу

В результате проведенного анализа и оценки действующих технологических процессов изготовления дисков было установлено, что заданная точность не достигается на многих операциях технологического процесса, а невозможность обеспечения окончательной точности после изготовления диска является результатом технологической наследственности от всех операций технологического процесса.

В связи с такими выводами было принято решение о необходимости разработки новой технологии изготовления дисков на основе концепции использования динамической стабилизации на тех стадиях технологического процесса, где возникают остаточные напряжения: после вырезки заготовок из листа, после предварительного и после окончательного шлифования (рис. 2).

Проведенные исследования подтвердили невозможность достижения заданной точности по отклонению от плоскостности не более 0,3 мм для

дисков с диаметрами до 950 мм при использовании различных известных вариантов технологических процессов без динамической стабилизации.

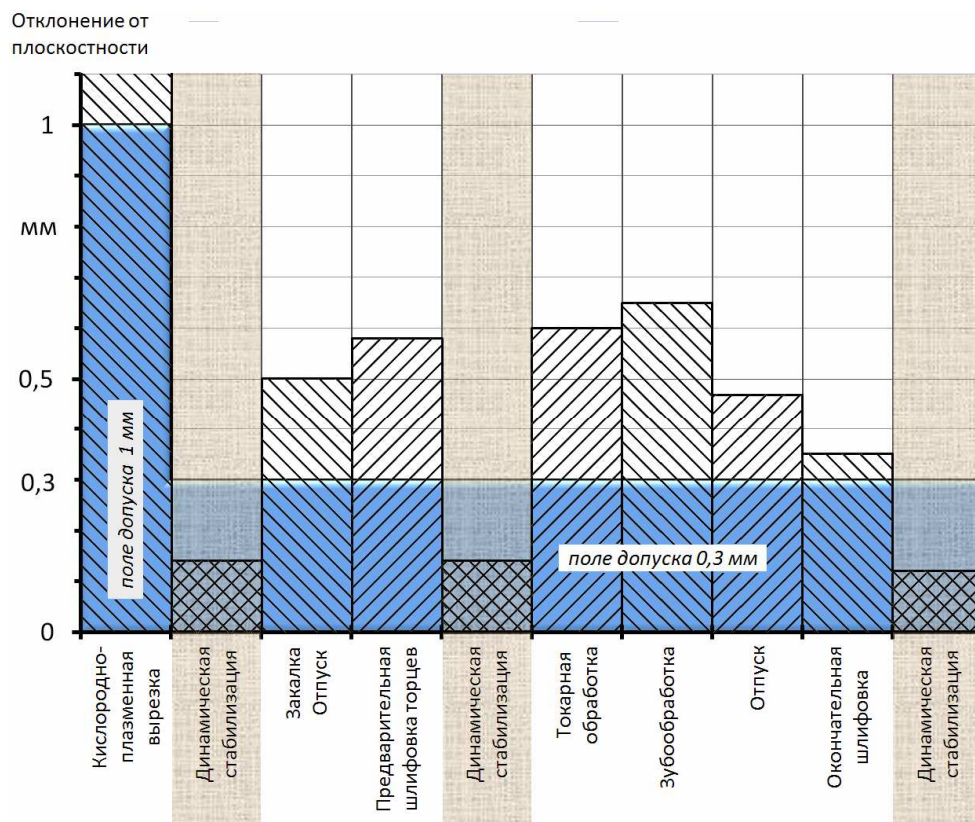


Рис. 2. Рекомендуемый технологический процесс изготовления дисков с использованием динамической стабилизации

В работе предложена технология изготовления дисков, основанная на концепции использования динамической стабилизации на тех стадиях технологического процесса, где вследствие технологической наследственности возникают наибольшие отклонения от плоскостности рабочих поверхностей дисков: после вырезки заготовок из листа, после предварительного и после окончательного шлифования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын, П. И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. – Минск : Вышэйшая школа, 1974. – 606 с.
2. Антонюк, В. Е. Технологическая классификация принципов динамической стабилизации параметров деталей / В. Е. Антонюк, Э. М. Дечко, В. В. Рудый // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2007. – № 12. – С. 12 – 18.
3. Рудый, В. В. Работоспособность фрикционных тормозных дисков карьерных самосвалов семейства БелАЗ / В. В. Рудый, В. Е. Антонюк, Э. М. Дечко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 81 – 86.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

И. А. Иванов

Белорусский национальный технический университет, Минск

В работе обсуждаются основные проблемы и перспективные подходы к проектированию вакуумных систем технологических установок. Анализируются факторы, влияющие на работоспособность систем, как, например, газонатекание, связанное как с технологическим процессом, так и с обратным потоком по трубопроводам от систем откачки. Рассматриваются основные требования, предъявляемые к выбору средств получения вакуума и принятию компоновочных решений.

Современный этап развития инновационных технологий получения и обработки композиционных материалов и функциональных наноструктурных покрытий характеризуется расширением области применения вакуумной техники. Вакуумная система любой технологической вакуумной установки служит для обеспечения необходимых условий реализации технологического процесса в течение длительного времени. Она включает в себя откачиваемый рабочий объем, в котором создается и поддерживается давление ниже атмосферного; трубопроводы, клапаны и затворы, а также другую коммутационную вакуумную арматуру, необходимую для соединения откачиваемого объема с системой откачки; средства получения вакуума, представляющие собой один или группу вакуумных насосов. Даже такая обобщенная классификация структурных элементов показывает, что вакуумная система является достаточно сложной и разветвленной многофакторной структурой. Это препятствует разработке единых критериев оценки качества предлагаемых проектных решений и автоматизации самого процесса проектирования. Компоновочные решения при разработке вакуумных систем, основанные на структурно-функциональном анализе ее составных частей, являются крайне важными, так как определяют стоимость готовых вакуумных установок, их энергопотребление, затраты на ремонт и текущее обслуживание.

В работе ставилась задача проанализировать основные проблемы и перспективные подходы к проектированию вакуумных систем технологических установок.

Основным элементом вакуумной системы является вакуумная камера, в которой поддерживается вакуум и происходит реализация технологи-

ческого процесса. Расчет камер на прочность регламентируется рядом ГОСТов (как межгосударственных стандартов) [1, 2]. Методики принятия компоновочных решений включают учет типа используемых вакуумных насосов, наличия средств измерения и контроля вакуума, требований технологического процесса [3]. Однако в ряде случаев необходимо учитывать условия и характер газонатекания в откачиваемый объем, связанные как с самим технологическим процессом, так и с обратным потоком по трубопроводам от систем откачки. Газонатекание, как правило, носит распределенный характер с разной интенсивностью источников. Неконтролируемое газовыделение формирует внутри откачиваемого объема условия, далекие от идеальных, что может сказаться на точности инженерных расчетов [4].

Существенное влияние на работу системы в целом, в том числе и в откачиваемом объеме, оказывают различные температурные неоднородности, особенно характерные для криовакуумной техники. Это требует учета тепловых потоков и их влияния на эффективность работы вакуумной системы.

При движении газовый поток испытывает сопротивление со стороны вакуумной арматуры: трубопроводов, затворов, клапанов. Все эти устройства могут вносить существенные изменения в характер течения, что также нужно учитывать при детальном расчете [5].

Вакуумные насосы являются последним звеном в любой вакуумной системе. От качества их работы зависит эффективность всей системы. Вакуумная система может включать в себя несколько насосов – низко- и высоковакуумных, которые могут работать как одновременно, так и по очереди, обеспечивая непрерывную откачку. Способ подключения насосов может быть последовательным или параллельным [6]. Это требует оценки длительности нестационарного режима работы насосов, совместимости насосов во всем рабочем интервале по давлению.

Задачами компоновочных решений и факторами, влияющими на выбор вакуумных схем, являются реализация технологического процесса (это требование рассматривается как основное, определяющее все последующие проектировочные решения), производительность, энергоемкость, металлоемкость, простота обслуживания.

Основным признаком принадлежности вакуумной системы к тому или иному классу может являться применяемое в ней оборудование откачки. Вакуумные системы для получения низкого вакуума обеспечивают получение в вакуумной камере рабочего давления от 10^5 до 10^1 Па. Как правило, вакуумные системы для получения низкого вакуума имеют одну вакуумную цепь. Тип вакуумного насоса выбирают по предельному давлению и (или) составу остаточных газов. Кроме типа насосов, важную роль играет их производительность, состав и степень достигаемого вакуума,

продолжительность поддержания рабочих режимов. Коэффициент использования насоса выбирают из экономических соображений либо по аналогии с существующими системами. Для насосов с величиной эффективного быстрогодействия ниже 10^{-1} м³/с существенное влияние на эффективность их использования оказывает число соединительных элементов в вакуумной цепи. Однако использование насосов с увеличенной скоростью откачки не всегда возможно по технологическим требованиям.

Масляная откачка характеризуется использованием пароструйных насосов в качестве высоковакуумных. Для уменьшения обратного потока паров вакуумного масла в вакуумную камеру на входе в высоковакуумный насос устанавливается вакуумная ловушка. Вакуумные системы для получения среднего вакуума предназначены для получения вакуума от 10^5 до 10^{-2} Па. Данные вакуумные системы имеют две вакуумные цепи (два вакуумных насоса). Эти вакуумные цепи могут использовать в качестве конструктивных элементов одни и те же элементы (клапана, трубопроводы и т.п.).

При разработке вакуумной схемы следует учитывать, что при откачке до давления ниже 10 Па (0,1 мм рт. ст.) механический насос дает обратный поток паров масла. Если технологический процесс не допускает попадания паров органических соединений в вакуумную камеру, то в качестве высоковакуумного насоса рекомендуется использовать турбомолекулярные насосы. Такую систему откачки называют безмасляной.

Таким образом, проектирование вакуумных систем, несмотря на наличие типовых решений, требует не только знания рабочих характеристик вакуумного оборудования, но и наличия методик расчета вакуумных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт ассоциации РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА СА 03-003-07 Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
2. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Государственный стандарт СССР – М., 1989.
3. Технологическое вакуумное оборудование. Ч. 1: Вакуумные системы технологического оборудования / Л. В. Кожитов [и др.]. – М. : МГИУ, 2010.
4. Иванов, И. А. Анализ математических подходов к описанию движения сильно разреженных газов / И.А. Иванов // Сб. трудов XVI Международной НТК «Машиностроение и техносфера XXI века», 14 – 19 сентября, 2009 г., г. Севастополь. – В 4-х т. – Донецк : ДонГТУ, 2009. – Т. 1. – С. 276 – 279.
5. Иванов И.А. Проектирование вакуумных систем технологических установок на основе структурного и параметрического синтеза (Современные методы и технологии создания и обработки материалов / И. А. Иванов // IV Международная НТК – Минск, 19 – 21 октября, 2009 г. Сб. материалов. В 3 кн. Кн. 3: Обработка материалов давлением. Пленарные доклады. – Минск : ФТИ НАНБ, 2009. – С. 199 – 204.
6. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. – М. : Высшая школа, 2007.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ

Ж. А. Мрочек

Белорусский национальный технический университет, Минск

Представлены результаты измерений физико-механических и эксплуатационных свойств восстановленных рабочих поверхностей деталей с использованием электромагнитной наплавки (ЭМН).

Физико-механические и эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей машин, в том числе восстановленных, в значительной степени определяют их долговечность [1]. В связи с этим придается большое значение обеспечению высокого качества поверхностей деталей после их восстановления методами наплавки.

Поскольку наплавленный металл отличается неоднородностью структуры и химического состава, наличием сварочных дефектов (пор, трещин, шлаковых включений и др.), значительными показателями твердости, высокой внутренней напряженностью и другими дефектами, представляет большой интерес оценка эксплуатационных свойств покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с поверхностно-пластическим деформированием (ППД) порошков. Известно, что скорость изнашивания находится в обратной зависимости от качества поверхности детали, а качество – в прямой зависимости от химического состава материала, микро- и субмикро-структуры. Процессы изнашивания зависят и от сил трения, о природе которых существует несколько теорий: механическая (теория Амонтона – Кулона), молекулярная (Б. В. Дерягина) и молекулярно-механическая (И. В. Крагельского).

Результаты измерений износостойкости покрытий были получены в условиях гидроабразивного изнашивания при трении скольжения с использованием машины 2070 СМТ-1. Количественная оценка износостойкости покрытий осуществлялась по схеме «вал-колодка» линейным методом при условиях: удельная нагрузка – 3 МПа, относительная скорость скольжения – 1,2 м/с, среда – масло индустриальное 20, содержащее 2% карбида бора зернистостью 4-5 мкм. Компоненты и условия испытаний выбирались как наиболее объективно отражающие условия работы ряда деталей соединений «вал – подшипник скольжения» тракторов, автомобилей, сельскохозяйственных, транспортных, дорожно-строительных и ряда

других машин, которые обычно подвергаются разрушению по причине абразивного изнашивания [2...5].

Износостойкость покрытий измерялась на образцах, наплавленных и обработанных при оптимальных условиях и режимах формирования покрытий (образцы после наплавки подвергали абразивному шлифованию и магнитно-абразивной обработке для получения шероховатости поверхности $Ra = 0,63$ мкм), в сопоставлении с эталоном (сталь 45 нормализованная, закаленная на глубину 1,2...1,6 мм до 52...54 HRC).

Кроме того, учитывали, что абразивное изнашивание имеет преимущественно механический характер разрушения поверхности. Интенсивность его при этом в наибольшей степени зависит от твердости сопрягаемых материалов, удельной нагрузки и скорости перемещения поверхностей.

Анализ износостойкости покрытий для различных материалов порошков показывает, что решающее влияние на износостойкость электромагнитных покрытий оказывает химический и фазовый составы покрытий и способ их нанесения. Так, покрытия, полученные ЭМН с ППД, для всех исследуемых материалов порошков имеют более высокую износостойкость по сравнению с покрытиями, полученными ЭМН. Обусловлено это тем, что ППД повышает плотность и однородность покрытия; воздействует на формирование его структуры, обеспечивая ее дисперсность; изменяет характер распределения упрочненного слоя, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке; переводит тангенциальные остаточные напряжения растяжения в напряжения сжатия. В связи с этим повышается твердость покрытий и соответственно сопротивление механическому разрушению их поверхности, что и увеличивает износостойкость покрытий. Наибольшей износостойкостью обладают покрытия из порошков быстрорежущих сталей Р6М5Ф3 и Р6М5К5, а также ферробора ФБ-3 и сплава С-300.

Износостойкость этих покрытий значительно выше износостойкости эталона (сталь 45). Так, она в 1,7...2,1 раза больше для ЭМН и в 1,8...2,6 раза – для ЭМН с ППД. Далее в порядке убывания износостойкости следуют покрытия из порошков Fe%-10V и ПР-Сталь 45-1%B. Покрытия из порошка Fe-Ti, полученные ЭМН и ЭМН с ППД, имеют износостойкость почти равную эталону. Такую низкую износостойкость по сравнению с остальными составами порошков можно объяснять отсутствием карбидных фаз в структуре покрытия из порошка Fe-Ti.

Следовательно, в порядке убывания износостойкости покрытий последние можно как для ЭМН, так и для ЭМН с ППД расположить в следующей последовательности: Р6М5Ф3 → Р6М5К5 → С-300 → ФБ-3 → Fe%-10V → ПР-Сталь 45-1%B → Fe-Ti.

Минимальный износ контртела и соединения в целом получен для покрытия из порошка С-300, что обусловлено наличием в структуре покрытия остаточного аустенита – пластичной и более мягкой фазы, которая играет роль демпфера, снижающего динамические нагрузки на поверхностный слой, и ускоряет приработку деталей соединения. Соединение деталей с таким покрытием имеет небольшой момент и коэффициент трения как со смазкой, так и без нее. Износостойкость соединений с покрытиями из порошков С-300, Р6М5ФЗ и Р6М5К5 по сравнению с износостойкостью эталона, полученных как ЭМН, так и ЭМН с ППД, уменьшилась соответственно на 1,8 и 1,86; 1,50 и 1,57; 1,38 и 1,4. Для покрытий из порошков Fe%-10V, Fe-Ti, ПР-Сталь45-1%B и ФБ-З износостойкость увеличилась соответственно в 1,2 раза. Последние соединения имеют по сравнению с первыми наибольший момент и коэффициент трения со смазкой и без нее. Следовательно, для соединений, работающих при трении скольжения, желательно использовать покрытия из порошков С-300, Р6М5ФЗ и Р6М5К5, а для неподвижных соединений лучшими будут покрытия из порошков ФБ-З Fe%-10V, ПР-Сталь45-1%B и Fe-Ti.

Важнейшими показателями качества процессов формирования рабочих поверхностей трения при любых технологических схемах является стабильность и воспроизводимость неизменных эксплуатационных свойств изделий. Для ЭМН с ППД разброс параметров измерений не превышает 5...8%, для ЭМН – 12%, что свидетельствует о стабильности процесса электромагнитной наплавки.

Таким образом, износостойкость образцов с покрытием удовлетворяет требованиям, предъявляемым к деталям, изготовленным из низко- и среднеуглеродистых, а также низколегированных сталей, не подвергаемых упрочнению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 1998.
2. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995.
3. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : ВТИ НАН Беларуси, 1997.
4. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А. П. Ракомсин; под ред. П. А. Витязя. – Минск : Парадокс, 2000.
5. Остаточные напряжения / Ж. А. Мрочек [и др.]. ; под ред. С. С. Макаревича. – Минск : УП «Технопринт», 2003.

ПРОТЕКАНИЕ ПРОЦЕССА СВС ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. В. Клубович, М. М. Кулак, Ю. В. Хлопков
Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск

Изложены основные положения протекания процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) под действием лазерного излучения. Разработано оборудование для осуществления лазерного СВС. Представлены предварительные результаты лазерного СВС композиций Ti-C и Ni-B.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез, представляющий сильную экзотермическую реакцию, является весьма перспективной технологией с точки зрения получения материалов и изделий, обладающих уникальными свойствами [1].

Для управления параметрами процесса СВС и расширения его возможностей представляет научный интерес дополнительный подогрев реакционной зоны сфокусированным лазерным излучением [2, 3].

В управляемом лазерным излучением процессе СВС планируется решить следующие технические задачи:

1. При соответствующем подборе параметров лазерного облучения и состава реагирующей шихты процесс СВС будет идти только в зоне воздействия лазерного луча.

2. Дополнительный подогрев лазерным излучением шихты позволяет производить СВС смеси материалов, обладающих низкой экзотермической энергией.

3. Возможен синтез материалов, имеющих широкий спектр количественного элементного и фазового составов.

4. Подогрев поверхности подложки способствует схватыванию («припеканию») к ней образующихся материалов синтеза.

5. Послойный синтез образующихся материалов СВС позволяет получать изделия из сложных объемных материалов с высокими геометрическими параметрами.

Нами было разработано и изготовлено оборудование для изучения взаимодействия лазерного излучения с реагирующей шихтой СВС и проведены исследования процессов формирования материалов с высокими физико-механическими свойствами.

В качестве активной среды использовали порошки Ti + α C и Ni + α B, находящиеся в стехиометрическом соотношении $\alpha = 1$. Указанные компо-

зиции в результате протекания СВС образуют материалы, обладающие уникальными химическими и физическими свойствами. Порошковую смесь наносили методом свободного насыпания на керамическую подложку из оксида алюминия.

В качестве основного источника лазерного излучения использовали установку «Квант-15» с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 4 мс и частотой следования 10 Гц. Энергию импульса варьировали от 1 до 5 Дж, а размер пятна излучения составлял 100...500 мкм. Относительная скорость перемещения луча и зоны воздействия составляла 0,5...3,0 см/с. Физические процессы, протекающие при СВС, зависели от состава смеси, плотности мощности излучения и скорости перемещения рабочей кюветы. Совокупные характеристики параметров процесса подбирали таким образом, чтобы СВС протекал только в границах, близких к размеру пятна облучения.

Схема наиболее важного узла установки, а именно реакционной кюветы, приведена на рисунке 1.

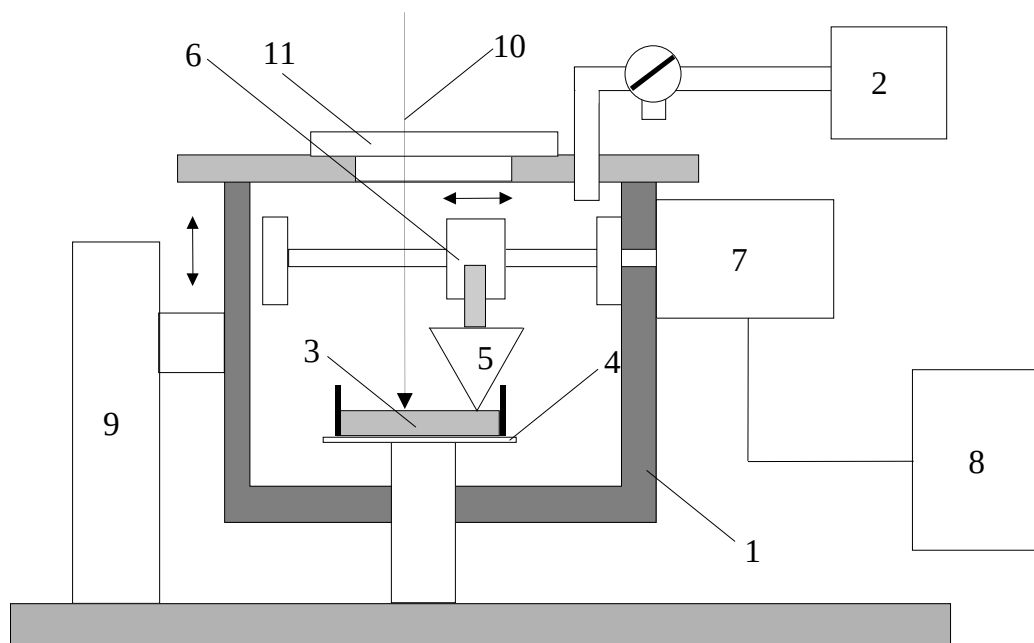


Рис. 1. Реакционная кювета для лазерного СВС

В герметичной кювете 1 через газовую систему 2 создавали контролируемую атмосферу или вакуум. Металлический порошок 3 наносили на подложку 4 слоями одинаковой толщины при помощи питающего бункера 5. Возвратно-поступательное движение бункера обеспечивается механизмом типа винт-гайка 6 с приводом от электродвигателя постоянного тока 7. Управление двигателем осуществляется от устройства 8. Толщину наносимых слоев порошка регулировали вертикальным перемещением корпуса кюветы вместе с бункером относительно подложки при помощи устройст-

ва 9. Сфокусированное излучение лазера 10 направляли в кювету через окно из кварцевого стекла 11.

В процессе предварительных исследований установлено, что подогрев исходной шихты сфокусированным лазерным излучением существенно влияет на параметры процесса СВС, что проявляется в следующем:

1. За счет дополнительного баланса энергии возможно значительное уменьшение объема реагирующей массы.

2. Реакция СВС идет при составе компонент, отличающихся от стехиометрического соотношения $\alpha = 1$.

3. Зона протекания процесса сильно зависит от плотности, мощности и скорости перемещения лазерного луча. При высоком лазерном энерговыделении реагирующая зона может значительно превышать размеры пятна фокусировки. Подбор параметров процесса позволяет производить синтез в пределах зоны воздействия лазера.

4. Формируемые за один ход синтезируемые слои надежно соединяются друг с другом.

5. Наличие инертной атмосферы или вакуума обязательно.

На рисунке 2 приведена фотография следа лазерного СВС порошка в одном из исследуемых режимов. Отмечается расплавленный характер образующейся компоненты и малый ее размер.

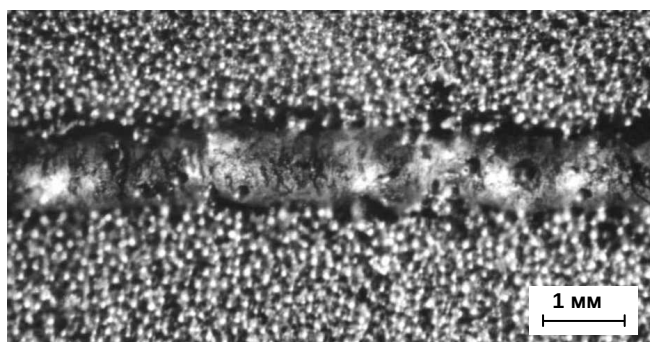


Рис. 2. Фотография реакционного следа лазерного СВС на поверхности Ti-C ($q \approx 10^4$ Вт/см², $V = 2$ см/с)

ЛИТЕРАТУРА

1. Khina, B. B. Combustion Synthesis of Advanced Materials / B. B. Khina. – New York : Nova Science Publishers, 2010. – 110 p.
2. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий / И. В. Шишковский. – М. : Физматлит, 2009. – 421 с.
3. Клубович, В. В. Взаимодействие лазерного излучения с реагирующей смесью СВС / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Ю. В. Хлопков // Перспективные материалы и технологии: сб. ст. Междунар. науч. симп., Витебск, 2011 г. / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2011. – С. 65 – 68.

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ РЕМОНТНОГО ФОНДА ДВИГАТЕЛЕЙ

А. П. Кастрюк

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Определены основные повреждения деталей ремонтного фонда и доли деталей различных классов с различными повреждениями. Сведений, полученные в работе, необходимы для определения объемов восстановления деталей, затрат труда и потребности в запасных частях.

Техническое состояние деталей ремонтного фонда определяется износами, деформациями, усталостными изменениями и старением материала. Последующий анализ выявляет причины достижения деталями предельного состояния. Этими причинами могут быть «узкие» места в процессах изготовления и восстановления деталей (недостатки конструкции, неудовлетворительный выбор материалов, механической и термической обработки).

Детали, которые определяют долговечность агрегата (их отказ вызывает потребность в его капитальном ремонте), называются ресурсными. Их долговечность высока и за срок службы агрегата они восстанавливаются один-два раза. Состояние остальных (недолговечных) деталей определяет безотказность агрегата.

Детали ремонтируемых машин по форме и служебному назначению разделяют на классы: корпусные, прямые круглые стержни с гладкой и фасонной поверхностью, полые стержни, диски с гладким и фасонным периметром, некруглые стержни, крепежные детали. В работе рассмотрены представители названных классов деталей за исключением зубчатых колес, для которых не разработаны эффективные способы восстановления.

Определялись минимальные объемы выборок деталей для получения информации с допустимой погрешностью. Для измерения основных параметров применялись универсальные и специальные средства измерений.

Данные измерений изображались в виде полигонов распределений, к которым подбирались наиболее подходящие теоретические кривые распределений из числа законов: нормального, логарифмического нормального, Вейбулла, Релея и модуля разности. Соответствие теоретических распределений данным экспериментов определялось с помощью критерия Пирсона χ^2 .

Основные повреждения прочностного и точностного характера корпусных деталей (блоков цилиндров): пробоины, трещины, деформирование отверстий под подшипники и гильзы.

Пробоины стенок наблюдались чаще у двигателей старых моделей, в том числе у 2% двигателей Д-240. Блоки цилиндров с пробоинами, распространяющимися от одной поперечной перегородки до другой или с выходом на обработанную плоскость, являются неремонтнопригодными. Самыми распространенным повреждением прочностного характера являются трещины их элементов (15...27% от всех повреждений). Наиболее часто трещины возникают в стенках водяных рубашек (5...19%), в перемычках цилиндров (1...7%), плоскости под головку цилиндров (до 6%) и бобышках под шпильки крепления головок цилиндров (до 5%). Трещины от циклических или разовых динамических нагрузок (сквозные и несквозные) имеют длину от 2 до 500 мм.

Распространенные повреждения точностного характера: отклонение диаметра коренных опор и их несоосность и отклонение диаметра отверстий под гильзы от номинального значения. Наблюдаются отклонения диаметра коренных опор от номинальных значений до 100 мкм, диаметров отверстий под гильзы до 200 мкм, неплоскостности поверхности под головку цилиндров 60...200 мкм.

До восстановления 22,5% гильз цилиндров, например, двигателей ЗМЗ-53, имели номинальный размер цилиндра, 40 % – первый ремонтный размер, 30 % – второй и 7,5 % – третий. Средний износ зеркала цилиндра для гильз номинального размера составляет 0,206 мм, гильз первого ремонтного размера – 0,252 мм, второго ремонтного размера – 0,225 мм и третьего ремонтного размера – 0,203 мм. Модальные значения износов гильз цилиндров двигателей Д-240 и отклонений диаметров их центрирующих поясков от номинальных значений равны 0,05 мм.

Твердость материала гильз цилиндров, уменьшающаяся после снятия поверхностных слоев при растачивании, изменяется в широких пределах от 10 до 40 HRC, что объясняется плохим качеством отливок. Высокая интенсивность изнашивания гильз отремонтированных двигателей по сравнению с гильзами после изготовления (до 1,5 раз) объясняется, кроме того, неудовлетворительной обработкой резанием, следствием которой являются большие отклонения параметров формы и шероховатости от нормативных.

В шатунах деформируются отверстия кривошипной и поршневой головок и изменяется межосевое расстояние этих отверстий. В очень небольшом количестве шатунов были выявлены усталостные трещины в теле. В отверстие поршневой головки шатуна при его восстановлении запрессовывают новую бронзовую втулку с последующим ее дорнированием и тонким растачиванием, поэтому состояние этого отверстия, как правило, не определяют. Отверстие кривошипной головки имеет тенденцию к увеличению диаметра. Примерно равные доли шатунов имеют увеличенные или уменьшенные межосевые расстояния.

Поршни относятся к интенсивно изнашиваемым деталям, поэтому предусматривают их замену при капитальном ремонте двигателей новыми деталями. В свою очередь износы поршней современных быстроходных двигателей глубоко не исследованы. Основные повреждения поршней: износы юбок, отверстий под поршневой палец и поверхностей под поршневое кольцо. Эти повреждения встречаются у 47...57% поршней ремонтного фонда. В поле допуска на изготовление укладываются 45,2 и 22,4% юбок поршней двигателей ЗМЗ-53 и Д-240 соответственно. По диаметрам отверстия под поршневой палец доля годных поршней двигателей ЗМЗ-53 составляет 93,3% и 20,5% – двигателей Д-240. Доля годных поршней по ширине канавки под верхнее поршневое кольцо составляет 32,0%.

Поршневые пальцы изнашиваются по поверхности, сопрягаемой со втулкой поршневой головки шатуна, в 2,7 раза интенсивнее, чем сопрягаемой с бобышками поршня. Износ поршневых пальцев не превышает 0,03...0,04 мм, что дает основание пересмотреть решение о сплошном нанесении покрытий и шлифовании под номинальный размер. 82,5% поршневых пальцев укладываются в допуск на размер, установленный заводом-изготовителем.

В капитальный ремонт направляют двигатели, коленчатые валы которых существенно изношены и требуют нанесения покрытий. 8...35% валов имеют недопустимую несоосность коренных шеек, обусловленную их заклиниванием в шатунных или коренных подшипниках. Деформации (прогибы) валов находятся в пределах 0,01...0,20 мм, в среднем – 0,03...0,05 мм. Прогибы валов, получивших аварийные изгибы от заклинивания и задиров шеек, составляют 0,2...2,5 мм (в среднем 0,58...0,78 мм). Только 10...13% валов вышли из ремонтных размеров и требуют наплавки.

Средние износы шеек составляют 30...90 мкм, а максимальные не превышают 100...150 мкм. Аварийные износы при схватывании шеек с вкладышами достигают 150...230 мкм. Как правило, коренные шейки изнашиваются интенсивнее шатунных в 1,6...1,7 раза.

У распределительных валов наблюдается более равномерный и меньший по значению износ опорных шеек по длине окружности в сравнении с износом шеек коленчатого вала. Кулачки и шейки распределительных валов тракторных двигателей шлифуют реже, чем автомобильных двигателей. Значимой разницы между износами впускных и выпускных кулачков не замечено. Кулачки практически не изнашиваются по цилиндрической части, где трение незначительное. Наблюдается значительный износ вершин кулачков (до 0,75 мм для двигателей ЗМЗ-53 и 1,0 мм для двигателей Д-240), на которые приходятся максимальное радиальное усилие от сжатых клапанных пружин, а радиус кривизны профиля минимален. Если упрочнить вершины кулачков, то значительно улучшатся экономические показатели работы двигателя.

В производстве наблюдается сплошное нанесение покрытий на стержни клапанов и шлифование фасок для устранения биения. Однако измерения показывают, что доля годных клапанов по стержням двигателей ЗМЗ-53 составляет 38,5...87,5% и двигателей Д-240 – 80,0%, по биению фаски – 15,8% и по высоте цилиндрических поясков – 22,8%. Стержни впускных клапаны изнашиваются более интенсивно по сравнению со стержнями впускных клапанов.

На основании сведений, полученных в работе, устанавливают долю годных деталей, используемых без восстановительных работ, объемы восстановления деталей и соответствующие затраты труда, потребность в запасных частях.

УДК 621.691

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Н. А. Руденская

Технопарк БНТУ «Политехник», Минск

Н. В. Соколова

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

К. Й. Чой, А. В. Новоселов, М. В. Руденская

Техплазма, Дмитров

Работа посвящена качественной оценке структуры керамических покрытий, сформированных с использованием сверхзвукового плазменного генератора.

Плазменные генераторы для нанесения покрытий выбирают исходя из состава, дисперсности исходных порошков и тех свойств, которые требуется придать покрытию. Широкие возможности современных плазмотронов позволяют успешно напылять различные виды и составы микрокомпозитов.

Цель работы состоит в реализации сверхзвуковой плазмы для напыления тугоплавких порошков в чистом виде и с минимальным содержанием компонента связки.

В качестве исходных материалов использовали керамические порошки: оксидные и боридные композиции. Порошки на основе боридов подвергали предварительной сфероидизации. Порошки наносили на стальные образцы с помощью дозвукового (покрытия Д) и сверхзвукового (покрытия С) плазмотронов. Материалом подслоя был выбран сплав Ni-Al.

Рассмотрим особенности структурообразования покрытий, содержащих оксиды и бориды. Сравнительный анализ микроструктуры свидетельствует о том, что покрытия, сформированные по технологии Д, характеризуются слоистой структурой. Покрытия, полученные по технологии С, имеют структуру композита: в материале матрицы равномерно распределены включения неправильной формы, их количество и размер увеличиваются при переходе от Al_2O_3 к оксидной керамике № 1 и № 2 (рис. 1). Слоистость материала матрицы обнаружена лишь в варианте с керамикой № 2.

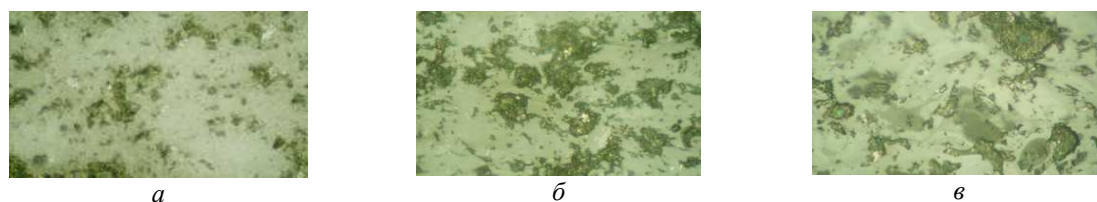


Рис. 1. Микроструктура оксидно-керамических покрытий:
а – Al_2O_3 ; б – керамика № 1; в – керамика № 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытий, полученных из порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ и сформированных при сверхзвуковом напылении, свидетельствуют о том, что матричный материал характеризуется слоистой структурой, зафиксированную только микрорентгеноспектральным методом (рис. 2).

Аналогичные результаты получены при сверхзвуковом напылении порошков типа «оксидная керамика» (рис. 3). В матричном материале на основе титана распределены слоистые и неправильной формы включения различных оттенков: светлые слои состоят из оксида алюминия; светло-серые и серые представляют собой алюмосиликаты переменного состава; включения темные – SiO_2 .

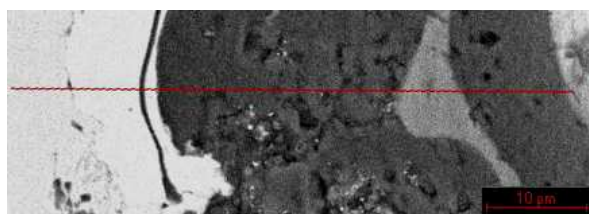


Рис. 2. Микроструктура покрытия, полученного из стандартного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$

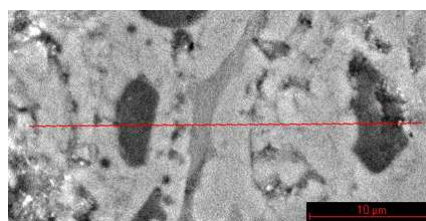
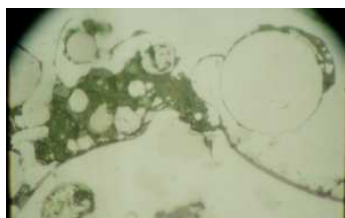


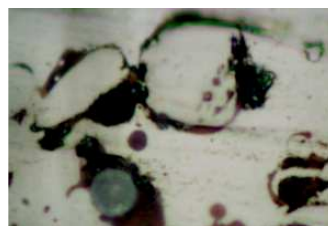
Рис. 3. Микроструктура покрытия, полученного из порошка «оксидная керамика»

Исходные порошки в виде микрокомпозитов на основе боридов хрома и титана перед напылением подвергали предварительной сфероидизации, чтобы придать частицам не только сферическую форму, но и плотную структуру, поскольку исходные бориды характеризуются развитой поверхностью и высокой пористостью. Получены зависимости выхода сферического продукта при обработке в низкотемпературной плазме этих ма-

териалов от размера исходных частиц. Исследования эффективности сфероидизации порошков показали, что композиции, содержащие CrB_2 , отличаются более высоким выходом сферического продукта в сравнении с порошками, в состав которых входит TiB_2 . Это отразилось на структуре покрытий, которые состоят из деформированных и исходных частиц (рис. 4). В варианте составов с CrB_2 исходные частицы в напыленном слое имеют сферическую форму (рис. 4, а).



а



б

Рис. 4. Микроструктура покрытий, содержащих дибориды: а – хрома, б – титана

В структуре TiB_2 -содержащих покрытий отмечено присутствие исходных частиц как сферической, так и неправильной формы (рис. 4, б). Кроме того, в покрытиях с диборидом титана имеются участки, соответствующие по составу TiO_2 . Оксидные фазы распределены в основном вокруг боридных включений (рис. 4, б), что свидетельствует о протекании интенсивного окисления. Насыщение материала кислородом происходит, главным образом, в процессе напыления порошка, так как сфероидизацию проводят в защитной среде.



Рис. 5. Микроструктура границы раздела боридных покрытий со стальной основой

Вторая часть исследований посвящена границе раздела покрытий со стальной подложкой. Здесь следует отметить, что все покрытия характеризуются высоким качеством этой зоны (рис. 5).

Необходимо отметить, в области материала подслоя присутствуют как слои, так и исходные частицы материала основного слоя покрытия. Это позволяет утверждать о перемешивании материалов основного слоя и подслоя в процессе формирования покрытия. Таким образом, в процессе напыления покрытий сначала формируется композиционный слой из материалов подложки и подслоя, а затем в этом композиционном слое появляются включения и тонкие слои из материала основного слоя покрытия (см. рис. 2, 5). На примере покрытий из CrB_2 наблюдается присутствие фрагментов подслоя в основном слое (см. рис. 5). Это возможно только в результате развития частицами высоких скоростей в потоке плазмы. Сравнительный анализ боридных покрытий показал, что CrB_2 -

содержащие слои отличаются высоким качеством как по высоте напыленного слоя, так и по границе раздела со сталью.

Таким образом, получены следующие результаты при напылении тугоплавких порошков сверхзвуковым плазмотроном: сформирована плотная композиционная структура основного слоя различных составов покрытий (содержащих оксиды и бориды Ti, Cr, Al, Si, Zr); граница раздела сталь – напыленный слой характеризуется также высоким качеством и композиционной структурой. Впервые получены плазменные покрытия из боридных порошков без материала связки.

УДК 621.9

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ «ТВЕРДОЕ» ТОЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ

С.А. Клименко, Ю.А. Мельнийчук, А.С. Мановицкий, А.С. Манохин
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
НАН Украины, Киев

Представлены практические примеры высокоэффективного «твердого» точения деталей из закаленных сталей, высокомарганцовистой стали, отбеленных чугунов, твердых сплавов, с наплавленным и напыленным покрытием инструментами, оснащенными ПСТМ на основе КНБ.

Для лезвийной обработки деталей из труднообрабатываемых сплавов эффективно применение резцов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ). Они обеспечивают шероховатость $Ra\ 0,32 - 0,63$, что в ряде случаев позволяет исключить процесс шлифования. Такая технология получила название – «твердое точение». В сравнении со шлифованием «твердое точение» обеспечивает увеличение производительности в 3 – 4 раза, позволяет существенно снизить энерго- и трудозатраты, расходы на оборудование и инструмент, повышает экологическую безопасность производства.

В Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ) разработаны ПСТМ «киборит» и «борсинит», организовано производство сменных многогранных неперетачиваемых пластин (СМНП) из них (формо-размеры соответствуют стандарту ISO 1832–85) и инструментов на их основе.

Ниже представлены примеры высокоэффективной обработки деталей из труднообрабатываемых сплавов разработанным инструментом.

Обработка деталей из закаленных сталей. Режущие инструменты, оснащенные ПСТМ, эффективно обрабатывают, допуская удары, детали из закаленных сталей ХВГ, ШХ 15 твердостью 60... 63 HRC со скоростью резания до 2,5... 3,0 м/с.

Инструменты с режущими пластинами SNMN 090306 и 120408 позволяют реализовать при обработке длинномерных деталей технологию «бреющего точения», при которой обработка производится с подачами до 0,7 мм/об и обеспечивается получение обработанной поверхности с шероховатостью Ra 0,5... 1,2. Использование квадратных режущих пластин обеспечивает 8 периодов стойкости по 40... 90 мин, что позволяет выполнять обработку крупногабаритных изделий с экономным расходом режущего инструмента.

В сравнении с чистовым точением бочки прокатного вала из стали 9ХС (55... 58 HRC) инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ «композит 10» или керамикой ВОК 71, разработанный инструмент и технология «бреющего точения» обеспечивает повышение объемной и поверхностной производительности в 3,37 и 8,4 раза соответственно.

Обработка деталей из высокомарганцовистой стали. Для обработки деталей из литой стали 110Г13Л разработаны пластины круглой формы из ПСТМ «киборит», которые позволяют эффективно обрабатывать различные поверхности, как по корке, так и после ее удаления. При точении по корке со скоростями резания 1,20... 1,67 м/с, подачами 0,3... 0,4 мм/об и глубиной резания до 8... 9 мм стойкость резца составляет 120... 180 мин. Обработка торцевой поверхности, имеющей неровности от плазменной отрезки литников, производится со скоростями резания 0,7... 0,8 м/с, подачами 0,25... 0,35 мм/об и глубиной резания до 6... 7 мм. Стойкость инструмента составляет 60... 90 мин.

Полная обработка брони из стали 110Г13Л конусной дробилки производится одним инструментом с режущей пластиной RNUN 190700Т, используя всю рабочую длину ее режущих кромок (10... 12 периодов стойкости), без смазочно-охлаждающих технологических сред и без введения в зону резания дополнительных видов энергии. Сравнение обработки брони твердосплавным инструментом, твердосплавным инструментом с плазменным подогревом и инструментом с пластиной из ПСТМ «киборит», показывает, что в последнем случае:

- в 5...7 раз повышается производительность обработки и в 2... 3 раза увеличивается стойкость инструмента;
- производительность обработки приближает к производительности плазменно-механической обработки, при меньшем расходе энергии и лучших условиях труда.

Обработка наплавленных и напыленных деталей. При обработке деталей с покрытиями высокую работоспособность имеют инструменты, оснащенные режущими пластинами из ПСТМ «киборит» и «борсинит». Выполняется как чистовая обработка, так и точение непосредственно по дефектной корке покрытия. Промышленные испытания показали, что резцы успешно обрабатывают детали, восстановленные наплавкой материалами мартенситного класса твердостью 40... 60 HRC, напылением с последующим оплавлением покрытий из порошков ПС-12HBK2-01 (65 % ПГ-10Н-01 + 35 % WC), ПГ-СРЗ, ПГ-СР4, ПГ-ХН80С4Р4, ПН85Ю15, а также напылением проволоками 65Г, 40Х13 и другими материалами.

Обработка деталей из отбеленного чугуна. На многих металлургических заводах для обработки прокатных валков из отбеленного чугуна используются вальцетокарные станки с ЧПУ. Эти станки оснащаются резцами с механическим креплением круглых пластин из керамики, которые обрабатывают валки с режимами резания: $v = 0,3 \dots 0,4$ м/с; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,3 \dots 0,5$ мм. Стойкость пластин составляет 1... 2 прохода по бочке валка.

Для точения валков разработаны режущие пластины (RB, C, PMH) из ПСТМ «борсинит» и оригинальная конструкция резца с их механическим креплением. Конструкция обеспечивает возможность работы инструмента при резании на дуге более 180°. Все проходы (черновые и чистовые) проводятся без переустановки режущей пластины. Сравнение результатов испытаний резцов с ПСТМ и керамическим инструментом показало значительное преимущество первых:

- по производительности обработки в 4... 5 раз;
- по стойкости в 3,0... 3,5 раза.

Резцы позволяют обрабатывать валки, как по бочке, так и по ручьям, с режимами резания: $v = 1,2$ м/с – на черновых проходах и 1,4 м/с – на чистовом проходе; $S = 0,2$ мм/об; $t = 1,5$ мм – на черновых проходах и 0,2 мм – на чистовом.

Обработка деталей из твердого сплава. Инструмент, оснащенный ПСТМ «борсинит», позволяет обрабатывать арматуру прокатных валков из твердых сплавов ВК25, ВК30. При работе со скоростями резания 0,2... 0,3 м/с режущий инструмент до износа по задней поверхности 0,25 мм обрабатывает 3 детали по 120 мм с 5-ю ручьями в каждой.

Приведенные примеры показывают высокую эффективность и широкие возможности инструментов, оснащенных ПСТМ. Ряд разработок ИСМ использовался и используется в настоящее время на ведущих предприятиях Республики Беларусь – Минском и Белорусском автомобильных заводах, Белорусском металлургическом заводе и др.

СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ**В. Г. Куптель, И. А. Каштальян, В. К. Шелег***Белорусский национальный технический университет, Минск*

Приведены результаты исследований составляющих силы резания при токарной обработке инструментами с вибровозбуждающими державками.

При вибрационном точении фактическая толщина срезаемого слоя определяется относительным положением поверхности резания на предыдущем и последующем оборотах заготовки, т. е. зависит от частоты колебаний и частоты вращения заготовки. За счет наличия сдвига фаз траекторий перемещения режущей кромки резца на двух соседних оборотах заготовки можно добиться явления, когда большая толщина среза будет совпадать с большим действительным передним углом γ , а малая – с меньшим. В этом случае средняя сила резания будет меньше, чем при традиционном точении. Наличие сдвига фаз приводит также к уменьшению среднего значения силы резания вследствие периодического перемещения режущей кромки резца в ненаклепанном или менее наклепанном на предыдущем обороте заготовки слое металла [1].

Известно, что сила резания P связана с глубиной резания t_p , подачей на оборот S_o и скоростью резания V_p нелинейной зависимостью вида

$$P = C_p \cdot t_p^{x_p} \cdot S_o^{y_p} \cdot V_p^{n_p}.$$

Значения постоянного коэффициента C_p и показателей степени x_p , y_p и n_p зависят от свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров режущей части резцов, условий смазки и охлаждения и т.д. Практически для всех конструкционных сталей общего назначения величина y_p находится в пределах $0,5 < y_p < 1,0$. Это указывает на то, что удельная сила резания с ростом толщины среза уменьшается. По этой причине среднее значение силы резания при вибрационном точении будет меньше силы резания при традиционном точении (с постоянной подачей) [1].

Экспериментальные исследования зависимости составляющих силы резания при традиционном и вибрационном точении выполняли с использованием токарно-винторезного станка модели 16К20 с нормальной технологической жесткостью. Обработка велась с применением подрезно-проходного резца-динамометра с механическим креплением трехгранной режущей пластины из твердого сплава Т15К6 [2] с геометрическими параметрами: $\varphi_u = 95^\circ$, $\varphi_{u1} = 5^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\gamma = 12^\circ$, $r_\epsilon = 0,8$ мм. Возбуждение вибрационного

движения режущей кромки резца-динамометра осуществлялось путем рационального изменения упругой технологической системы (за счет использования специально разработанной державки с упругим элементом).

Сохранение жесткости технологической системы при проведении экспериментов является одним из основных требований, предъявляемых к исследованиям сил резания. Этому требованию удовлетворяет метод измерения сил резания непосредственно по изгибным деформациям резца. Измерительным элементом в таких динамометрах являются проволоочные тензодатчики, наклеенные на теле резца. Деформация державки вызывает изменение сопротивления тензодатчика, включенного в мостовую цепь, что приводит к изменению тока в одной из диагоналей моста. Полученный ток усиливается и измеряется регистрирующим прибором (шлейфовым осциллографом). Схема измерения силы резания с использованием тензодатчиков приведена на рисунке 1.

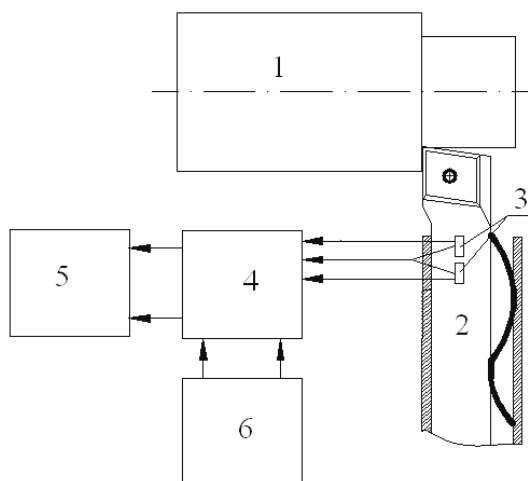


Рис. 1. Схема измерения составляющих силы резания: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – резец; 3 – тензодатчики; 4 – усилитель; 5 – гальванометр; 6 – стабилизатор

Тарировка резца-динамометра производилась в специальном приспособлении (рис. 2). Нагружение осуществлялось с помощью винтов. Приложенная нагрузка регистрировалась по образцовому динамометру сжатия.

Обрабатывали заготовки из стали 45 при различных скоростях резания. Способ закрепления заготовок: левый конец зажат в патроне, правый поджат центром задней бабки. На рисунке 3 представлены зависимости составляющих сил резания P_z и P_x от скорости резания.

Из графиков видно, что средние составляющие силы резания при вибрационном точении уменьшаются на 10...15% по сравнению с традиционным во всем диапазоне исследуемых скоростей.

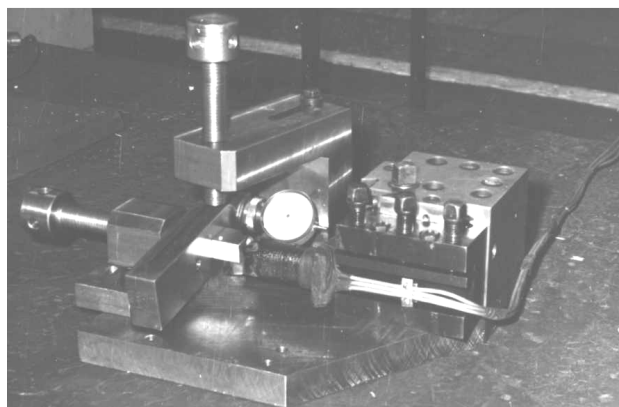


Рис. 2. Приспособление для тарировки резца-динамометра

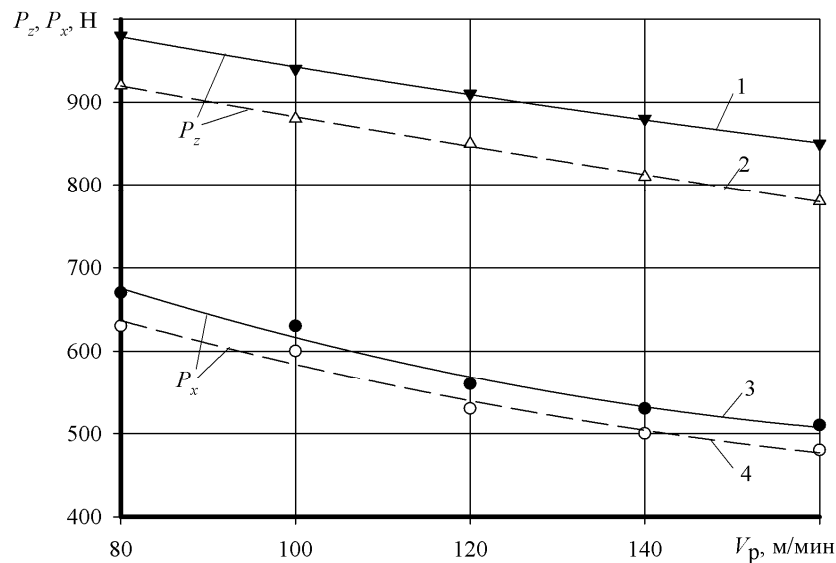


Рис. 3. Зависимости составляющих сил резания P_x и P_z от скорости резания V_p при традиционном и вибрационном точении:
1, 3 – традиционное точение ($t_p = 1,5$ мм; $S_o = 0,25$ мм/об); 2, 4 – вибрационное точение

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев, В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1978. – 304 с.
2. Каштальян, И. А. Физические параметры кинематически нестабильных режимов резания на токарных ГПМ / И. А. Каштальян // Материалы, технологии, инструменты. – 2003. – № 2. – С. 63 – 67.

УДК 621.787: 621.91

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В. Ю. Блюменштейн

*Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово*

Представлены правила и направления научных исследований технологического наследования качества поверхностного слоя деталей машин.

В рамках механики технологического наследования сформулированы правила в категориях программ нагружения [1]:

1. Технологическое наследование проявляется себя в формировании наследственных программ нагружения в зависимости от наследственных очагов деформации, выступающих в качестве комплекса начальных и граничных условий при решении задач механики деформирования.

2. История нагружения описывается в категориях программ на предшествующих стадиях нагружения. Технологическое наследование на каждой последующей стадии проявляется себя через трансформацию программ нагружения.

3. Наследуемая программа нагружения «затухает» в соответствии с экспоненциальным наследственным законом, что проявляется в смещении ПН на диаграммах пластичности. Скорость накопления деформаций на каждом последующем этапе уменьшается в соответствии с экспоненциальным наследственным законом.

4. Формирование программ по стадиям в зависимости от истории нагружения (от накопленной или наследуемой степени деформации сдвига) описывается линейным интегральным уравнением второго рода:

$$\Lambda(\Pi) = \Lambda_0 + k \sum_{j=1}^{j=n} \left\{ \int_{i=0}^{i=m} \left[\frac{1}{\Pi_{ij}} \cdot \frac{\Lambda_{ij}}{(-45,2) \exp(-(\Lambda(\Pi_i))^2 / 0,28)} \right] \Lambda(\Pi_i) d\Pi \right\},$$

где Λ – степень деформации сдвига, накопленная к данному моменту времени;

i – номер квазимонотонного этапа;

j – номер стадии нагружения;

$\Lambda(\Pi_i)$ – программа нагружения на текущем квазимонотонном этапе;

Λ_{ij} и Π_{ij} – соответственно степень деформации сдвига и показатель схемы напряженного состояния в конце текущего квазимонотонного этапа нагружения.

5. Остаточное напряженное состояние наследственно зависит от суммарных (накопленных) значений степени деформации и степени истощения запаса пластичности.

Технологическое наследование в механической постановке – это взаимодействие различных программ последовательного нагружения со все уменьшающимся очагом деформации, когда накопление дефектов на каждом последующем этапе происходит в условиях более «жестких» схем нагружения, чем на предшествующем.

Технологическое наследование – закономерность, характеризующая способность предшествующих программ нагружения оказывать влияние на формирование программ нагружения на последующих стадиях, и являющихся следствием определенной истории нагружения металла поверхностного слоя изделия.

Автор считает, что развитие основных положений теории технологического наследования имеет научную перспективу, а аналитические и экспериментальные исследования в этом направлении, в том числе, в наномасштабе позволяют уточнить разработанные математические и эмпирические модели, пополнить базу данных технологического наследования и выйти на уровень реального автоматизированного проектирования.

К числу важнейших задач автор относит следующие.

1. Развитие теории формирования и трансформации состояния поверхностного слоя на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Основными элементами теории являются: эволюционность, описание непрерывного формирования поверхностного слоя на стадиях механической

обработки с учетом истории нагружения; достоверные модели экспериментальной оценки запаса пластичности металла в зависимости от истории нагружения; физические закономерности накопления деформации и истощения запаса пластичности при сложных немонотонных нагружениях; унифицированные модели и физические закономерности течения металла в очагах пластической деформации; закономерности и взаимосвязи характеристик металла поверхностного слоя в макро-, микро- и нанометровом диапазонах.

2. Развитие представлений о наследственной механике резания и поверхностного пластического деформирования (ППД), а именно: развитие задач механики упрочняемого тела, в том числе, в объемной постановке; исследование и моделирование программ с учетом истории нагружения; топологическая и физическая 3D-характеризация поверхности (морфология, текстура, шероховатость, фазовый состав) в наношкале; оценка твердости, закономерностей и механизмов пластической деформации в наношкале; моделирование повреждений структуры и износа в нанометровом диапазоне; применение методов непрерывного измерения жесткости (CSM), оценка микроструктуры и механизмов локальной деформации в наношкале; наноскрэтчинг, исследование пластического волнообразования (pile-up) и очагов локальной пластической деформации, моделирование процессов резания и ППД и накопления пластической деформации в наношкале.

3. Развитие теории формирования и трансформации остаточного напряженного состояния в наследственной постановке, для чего расчеты (моделирование) тензора остаточных напряжений в упрочненном изделии с учетом пластической, упругой и тепловой составляющих на основе использования МКЭ, в том числе, в объемной постановке; наноиндентирование, определение тензора остаточных напряжений и его связи с основными механическими характеристиками; исследование закономерностей релаксации компонент тензора остаточных напряжений в процессах эксплуатации, в том числе, в нанометровом диапазоне; экспериментальные исследования показателя схемы напряженного состояния с учетом релаксации остаточных напряжений, в том числе, с использованием физических методов контроля упрочненного материала.

4. Развитие представлений о наследственной механике усталостного нагружения, в том числе: аналитическое и экспериментальное описание накопления малых (неупругих) деформаций и истощения запаса пластичности в каждом цикле усталостного нагружения с использованием наноразмерных методов и средств контроля; исследование закономерностей накопления предельных деформаций в точке вероятного разрушения металла поверхностного слоя в наследственной постановке; наноиндентирование, реализация циклических испытаний в условиях многоциклового и малоциклового нагружения; наноиндентирование, определение трещи-

нотойкости приповерхностных слоев; исследование накопления деформаций и истощения запаса пластичности в устье усталостной трещины в категориях теории технологического наследования.

5. Развитие представлений о наследственных программах нагружения в наноразмерном диапазоне, классификация упрочняющих деформирующих процессов на основе метода энтропийного анализа.

6. Уточнение основных положений методики проектирования упрочняющих технологий, обеспечивающих ресурсосбережение в процессах изготовления и высокую долговечность в процессах эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блюменштейн, В.Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин [Текст] / В.Ю. Блюменштейн, В.М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

УДК 621.313

ДИАГНОСТИКА ГТУ ПО СПЕКТРАМ МОДУЛЯЦИЙ ИХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Г. Н. Здор, В. Б. Тимошевич, И. Н. Северин

Белорусский национальный технический университет, Минск

Показана возможность контроля технического состояния газотурбинных установок (ГТУ) на газоперекачивающих станциях (ГПС) в реальном масштабе времени с использованием разработанного для поставленных задач программного продукта «Радиоспектр-1».

Газотурбинные двигатели широко используются в промышленности из-за их высокой эффективности, энергоемкости, возможности продолжительной работы, и к тому же они не требуют внешних источников электроэнергии. Их применяют в авиации, в составе мобильных электростанций небольшой мощности, в ГТУ в составе ГПС.

ГТУ в составе ГПС должны работать непрерывно в течение тысяч часов до плановой остановки на профилактику. Время от пуска до остановки определяется экспериментально и должно быть существенно меньше времени наработки на отказ в связи с серьезными затратами на ремонт, например, при оторвавшейся лопатке турбины. С другой стороны, при отсутствии серьезных повреждений безаварийный пуск остановленной турбины вовсе не гарантирован. Дело в том, что при увеличении частоты вращения турбокомпрессора, а затем и свободной турбины проходят величины, соответствующие резонансным частотам механических элементов ГТУ либо сопряженных с ней, как то опоры турбины и компрессора и другие корпусные детали. При этом

вибрации могут превысить допустимые значения, что вызовет аварийное отключение запуска. Таким образом, оптимальной можно считать ситуацию, когда ГТУ функционирует не межремонтный промежуток времени, а до появления информации об аварийных дефектах. Это увеличивает интервал работы ГТУ без снижения надежности работы.

Основными дефектами ГТУ являются механические. К ним относятся: износ подшипников, резонансные колебания, дисбаланс роторов, ослабление жесткости соединений, дефекты муфт и редукторов, трещины лопаток и другие. Главным методом их выявления в настоящее время является метод вибрационной диагностики, при котором контролируется виброскорость и виброускорение в заданном интервале частот. Каждый из дефектов проявляется на характерной частоте и имеет гармоники определенных амплитуд и добротностей. Изменения амплитуды либо добротности, а также сигналы на комбинационных частотах могут служить сигналом к остановке ГТУ.

При всех достоинствах вибрационной диагностики ей присущи определенные недостатки. К ним можно отнести зависимость сигнала от места и надежности установки, фиксированный для данного датчика достаточно узкий частотный диапазон, чувствительность только в одном направлении, ухудшение параметров с течением времени. С этой точки зрения кажется целесообразным использование датчиков, не уступающих датчикам вибраций, а в чем-то и превосходящих их.

К ним можно отнести радиодатчик [1, 2], фиксирующий радиоизлучение исследуемого объекта и позволяющий определить независимые величины: средний уровень сигнала (математическое ожидание), его флуктуации (дисперсию) и спектральный состав (автокорреляционную функцию), а также спектральный состав модуляций сигнала (взаимокорреляционная функция) при одном измерении. Радиидатчик устанавливается в ближней от исследуемого объекта зоне, где имеет место максимальное отношение сигнал / шум, либо в дальней зоне, где сформировалась электромагнитная волна (на расстоянии 3–5 длин волн) на кронштейне, и ориентируется по максимальному уровню излучения. Он настраивается на частотный диапазон с максимальным отношением сигнал / шум. В качестве примера можно привести спектры радиоизлучения ГТУ № 16 Невской ГПС в период эксплуатации и непосредственно перед аварийной остановкой.

Спектральные характеристики радиоизлучения сходны с такими же при вибродиагностике, что позволяет задействовать большой аналитический и статистический материал, накопленный при вибродиагностике, для контроля технических параметров и диагностики возникающих дефектов ГТУ по их собственному радиоизлучению. При этом необходимо учитывать, что часть дефектов при вибродиагностике проявляет себя не в виде

прогнозируемых частотных откликов, а как сигнал в некоторой частотной области, определенный статистически.

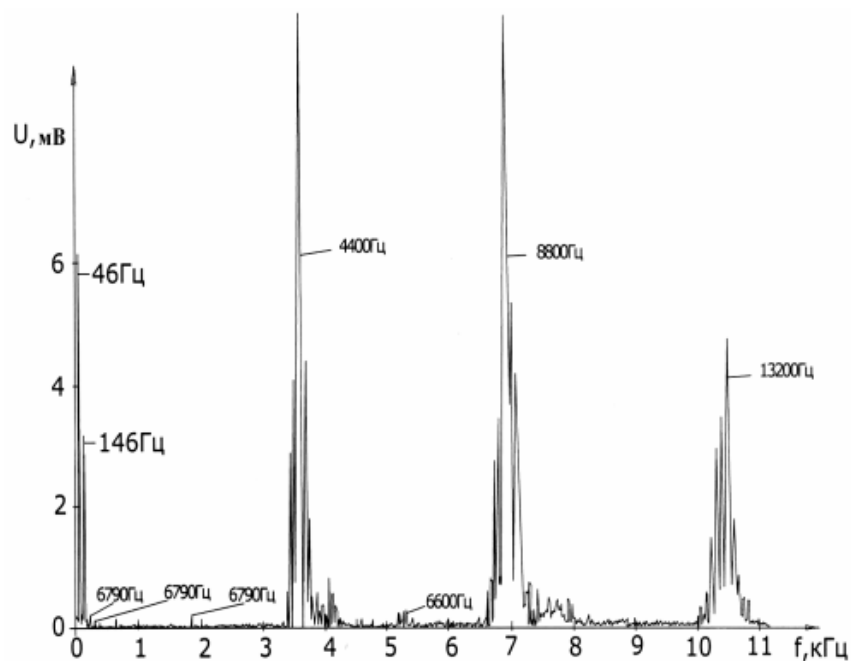


Рис. 1. Спектр АМ радиоизлучения 16-той ГТУ перед аварией

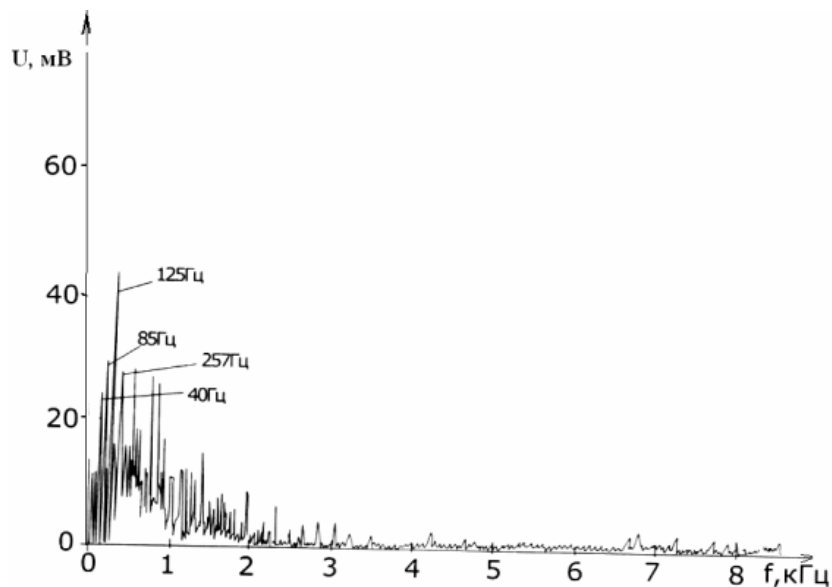


Рис. 2. Спектр АМ радиоизлучения 16-той ГТУ

Существующая противоречивость требований максимально возможного срока безостановочной работы ГТУ и недопустимости аварийных ситуаций вызывает необходимость внедрения методов контроля и диагностики в реальном масштабе времени. Этому в какой-то мере соответствуют используемые программные продукты, применяющие быстрое Фурье-преобразование. Однако их возможности, цена и ориентированность на виб-

родиагностику и конкретные технологические объекты не позволяют воспользоваться ими для диагностики ГТУ по спектрам радиоизлучения (как, впрочем, и многих других радиоизлучающих технологических процессов и объектов). Это вызвало необходимость разработки программного продукта «Радиоспектр-1», имеющего следующие возможности: снимаются данные, поступающие через аудио-вход звуковой карты компьютера, и производится быстрое Фурье-преобразование; полученный результат визуализируется на мониторе в виде построенной АЧХ. Этот программный продукт позволяет: проводить различные Фурье-преобразования, как то окно Ханна, окно Хеминга, окно Блэкмана; изменять частотный диапазон видимости, количество областей преобразования (для большего сглаживания или детализации спектра); отслеживать пики и выводить информацию о них (частоту, амплитуду, добротность); ограничивать число отслеживаемых пиков заданным диапазоном добротности; определять средний уровень сигнала (математическое ожидание), флуктуации (дисперсию), что позволяет осуществить контроль и диагностику состояния ГТУ в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гречихин, Л. И. Аппаратура и методы измерений флуктуационных характеристик радиосигналов, возникающих в различных технологических процессах / Л. И. Гречихин, В. Б. Тимошевич // Приборостроение. – Минск, 1989. – Вып. 11.
2. Здор, Г. Н. Собственные радиоизлучения и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования / Г. Н. Здор [и др.] // Известия АН Беларуси. – 2009. – № 2.

УДК 621.833;539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШУМА И ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МЕЖОСЕВОГО РАССТОЯНИЯ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

В. Н. Русецкий

Минский автомобильный завод, Минск

В. Е. Антонюк

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Э. М. Дечко

Белорусский национальный технический университет, Минск

Обосновывается необходимость использования методики двухпрофильного контроля для контроля конических зубчатых передач. Из-за отсутствия централизованного изготовления приборов двухпрофильного контроля для конических колес и измерительных колес этот метод не получил широкого распространения.

Оценка и снижение шума конических передач весьма актуальна [1].

Особенностью шума конических зубчатых передач является присутствие в его спектрах характерных частот, по которым можно производить объективную оценку качества передачи. Характеристики наиболее часто встречаемых характерных частот в спектрах шума зубчатых передач приведены в таблице.

Характерные частоты в спектрах шума зубчатых передач

Причины возникновения характерной частоты	Расчетная формула
Дисбаланс ведущей шестерни	$f_1 = n_1 / 60$
Дисбаланс ведомого колеса	$f_2 = n_2 / 60$
Частота пересопряжения зубьев	$f_z = n_1 z_1 / 60$
Вторая гармоника по частоте пересопряжения зубьев	$2f_z$
Третья гармоника по частоте пересопряжения зубьев	$3f_z$
Циклическая погрешность ведущей шестерни	$f_{q1} = a_1 f_1$
Циклическая погрешность ведомого колеса	$f_{q2} = a_2 f_2$
Погрешность профиля ведущей шестерни	$f_{r1} = f_z k_{r1}$
Собственная частота ведущей шестерни	$f_{рез}$

Примечание: n_1, n_2 – частоты вращения ведущей шестерни и ведомого колеса; z_1, z_2 – число зубьев ведущей шестерни и ведомого колеса; a_1, a_2 – число зубьев делительной пары станка для чистового нарезания ведущей шестерни и ведомого колеса; k_{r1} – коэффициент, учитывающий прерывность образования профиля на поверхности зуба (приближенно принимается равным числу резов на поверхности фрезерованного зуба).

Экспериментально установлен спектр шума конической передачи, в котором присутствуют характерные частоты. По ним можно выявить вероятные причины шума и наметить пути его снижения. Существующие методы нормирования и оценки уровня шума зубчатых передач мобильных машин не соответствуют современным тенденциям и методам контроля шума.

Технические требования по контролю шума в действующей конструкторской документации на зубчатые передачи не имеют технического обоснования для их объективного контроля. По результатам измерений в конструкторскую, технологическую или другую нормативную документацию вносятся соответствующие требования к контролю шума.

При определении шумовых характеристик конкретной зубчатой пары отбирается образцовая пара по шуму с шумовыми характеристиками, близкими к допустимым. Образцовая пара используется для субъективной оценки уровня шума контролируемых пар путем сравнения на слух уровня шума контролируемой и образцовой пары.

Для конических зубчатых колес отсутствует ГОСТ по проектированию измерительных колес для двухпрофильного зацепления.

ГОСТ 1758-81 регламентирует контроль по колебанию измерительного межосевого угла. Допускается вместо контроля измерительного межосевого угла контролировать осевое перемещение одного из колес в плотном зацеплении. Во всех случаях должны использоваться измерительные зубчатые колеса, у которых толщина зуба должна быть увеличена на величину среднего утонения, предусмотренного для измеряемого колеса.

В работе [2] описана система контроля конических зубчатых колес в двухпрофильном зацеплении и излагаются основные принципы проектирования измерительных и образцовых конических колес, а также требования к приборам двухпрофильного контроля для конических колес.

Схема контрольных и образцовых шестерен (колес), предназначенных для контроля шестерни и колеса прямозубой конической передачи, представлена на рисунке 2.

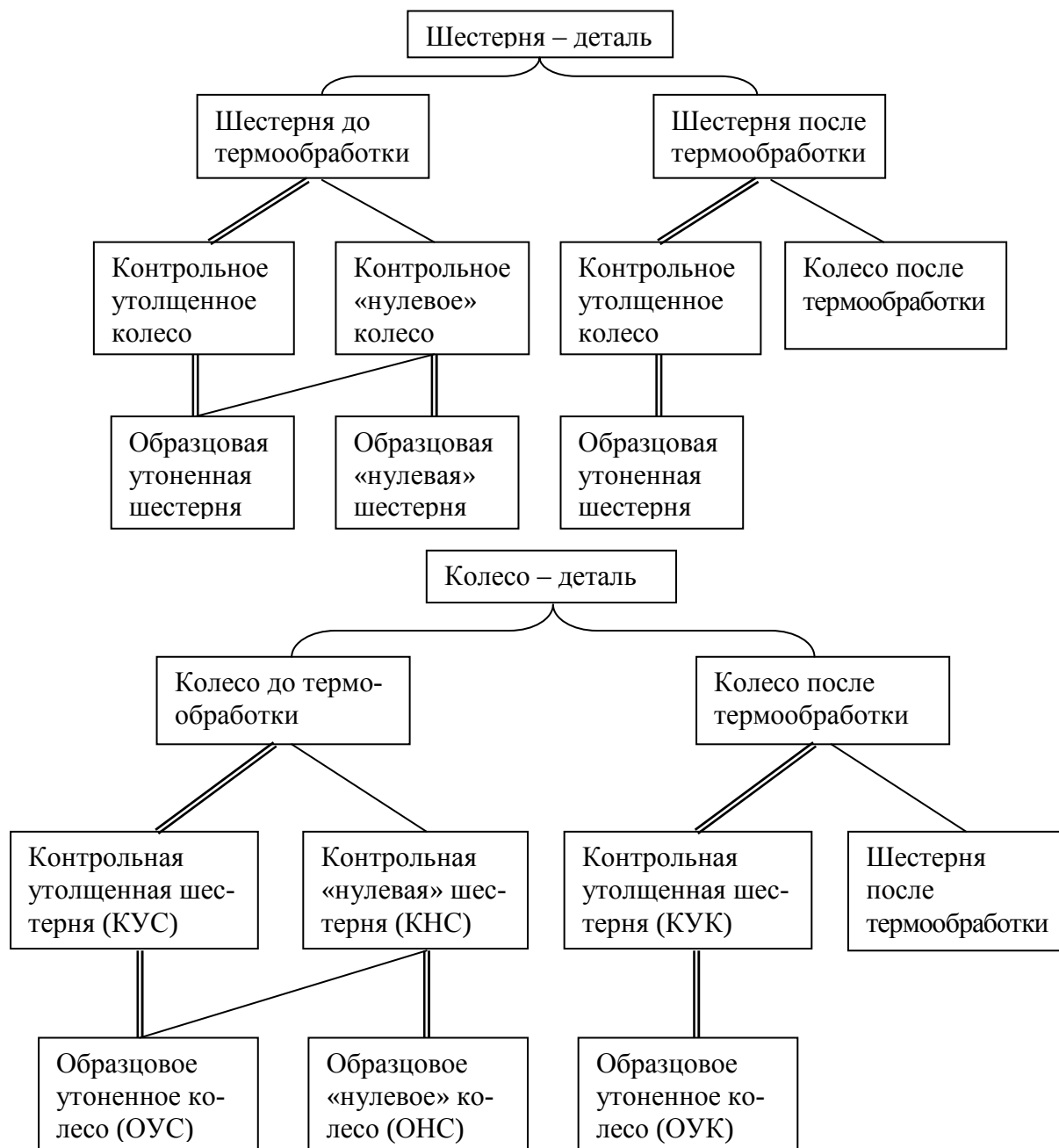


Рис. 2. Схема контрольных и образцовых шестерен (колес) для контроля шестерни и колеса прямозубой конической передачи:

- контроль на контрольно-обкатном станке
 ===== контроль на приборе двухпрофильного комплексного контроля (межцентромере)

Для оценки качества изготовления конической зубчатой пары с круговыми зубьями целесообразно использование двухпрофильного контроля. Допустимый уровень шума должен назначаться не только по общему уровню шума в дБА, но и по допустимому уровню шума на характерных частотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонюк, В. Е. Особенности зубошлифования конических передач с круговыми зубьями / В. Е. Антонюк, В. Н. Русецкий // Вест. Брест. гос. техн. ун-т. – 2006. – № 4 (40). – С. 23 – 28.
2. Антонюк, В. Е. Влияние некоторых конструктивных и технологических факторов на уровень шума конических передач с круговыми зубьями / В. Е. Антонюк, А. Ш. Прейгерзон. – Минск : БелНИИНТИ, 1970. – 40 с.

УДК 620.179.1.082.5.05

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПЛЕНКИ

И.Б. Опарина, А.Г. Колмаков

*Учреждение Российской академии наук Институт металлургии
и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

Полимерные покрытия находят применения в различных секторах экономики. Они могут использоваться в качестве защитных или упрочняющих слоев, но наиболее простое и распространенное применение в качестве упаковочной пленки. При производстве полимерной пленки основными контролируемыми параметрами являются толщина и длина. Для контроля этих параметров в автоматическом режиме предлагается использовать автоматизированную систему.

Описываемая система управления состоит из лазерного измерителя толщины пленки (точность измерения ± 1 мкм), средств автоматизации и программного пакета Master SCADA (рис. 1).

Для бюджетного варианта автоматизированной системы контроля целесообразнее использовать средства автоматизации российского производителя ОВЕН. У этой компании есть программа, позволяющая высшим учебным заведениям оснастить свои лаборатории современными средствами автоматизации на бесплатной основе.

В качестве измерителя в системе используется бесконтактный триангулярный датчик с аналоговым входом 4... 20 мА, напряжением питания 12 В. Питание обеспечивает блок БП15Б-Д2-12. Сигналы с лазерного датчика поступают на двухканальный измеритель ТРМ202, который контролирует толщину пленки путем вычисления разности расстояний от лазер-

ного датчика до поверхности пленки и подложки или плоскости скольжения пленки. При несоблюдении установленной толщины пленки и выход ее за допустимые пределы ТРМ202 сигнализирует об ошибке.

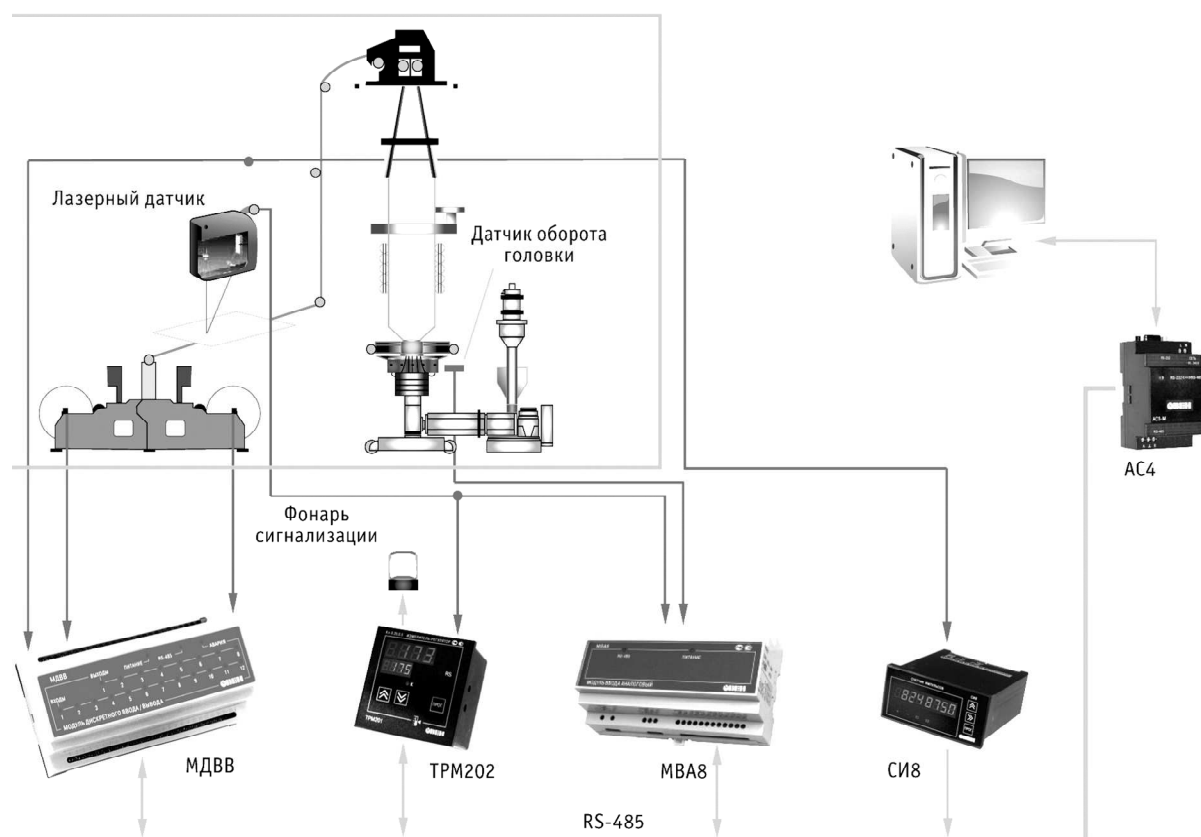


Рис. 1 Автоматизированная система контроля толщины пленки

От индуктивного датчика на счетчик импульсов СИ8 подается импульс оборота вытяжного вала, который, учитывая обороты вала, переводит их в метраж готовой пленки. Если пленка формируется в рулоны, то сигнал о готовности очередного рулона подается на входы модуля дискретного ввода МДВВ. Сбор всей необходимой информации в виде сигналов, поступающих с датчиков, осуществляет модуль МВА8. Переменное напряжение подается на приборы контроля через блок сетевого фильтра БСФ-Д2-0,6.

Программа обработки создана в оболочке Master SCADA. Все приборы объединены в сеть RS-485 по протоколу Modbus и подключены компьютеру через автоматический преобразователь интерфейсов USB/RS-485 AC4. Обмен данными осуществляется через OPC-сервер. SCADA-система формирует сменные отчеты. Отчеты могут включать в себя: время работы системы, среднюю толщину пленки, общую длину и т.п. Полученные данные хранятся в архиве и при необходимости используются для анализа факторов, влияющих на качество пленки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 10-08-90015-Бел_а) и программ РАН П-7 и ОХНМ-02.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Ж. А. Мрочек, В. В. Харченко

Белорусский национальный технический университет, Минск

Рассмотрены современные тенденции развития физических представлений для способов обработки материалов и их значение для технологий машиностроения.

Создание технологических процессов, и в частности электрофизических способов обработки, всегда было связано с развитием физических представлений о природных явлениях. Именно возможность управления природными явлениями позволяет выбирать те из них, в той последовательности и «объемах», которые обеспечивают достижение требуемых результатов при разработке технологий. На рубеже XX и XI веков разработаны и реализованы технологии, которые явно не укладывались в рамки общепринятых физических представлений. Это не могло не отразиться на стремлении к их расширению, уточнению или пересмотру. Расширение проводилось путем создания дополнительных представлений. Реализованные уточнения всегда были связаны только с процессами, происходящими в узкой области физических явлений. Тогда как пересмотр осуществлялся за счет отказа от использования общепринятых представлений о методах исследования, образовании вещества и создания новых представлений о них на основе экспериментальных данных, а не на предварительно принимаемых аксиоматических представлениях. В связи с наличием разнообразных подходов к развитию физических представлений целесообразно было бы их проанализировать и выбрать наиболее перспективный подход для его использования в машиностроении.

К дополнительным представлениям можно отнести, например, физическую мезомеханику [1] и термодинамику реальных процессов [2]. Узкими областями уточнений являются, в частности, уточнение моделей развития напряженно-деформированного состояния [3] и особенностей металлической структуры [4]. Следовательно, к пересмотру можно отнести новые представления о моделировании, позволяющем связывать различные физические явления [5], а также об образовании молекулы [6] и соединении твердых тел [7, 8], созданные на основе имеющихся экспериментальных данных об электрическом заряде и его свойствах. Примеры расширения представлений выбираются произвольно, поскольку особенности подходов к их реализации фактически идентичны. Эти особенности совпадают с решениями разнообразных задач

в различных разделах, как экспериментальной, так и теоретической физики. Одна из таких особенностей связана с ограничением областей используемых исследований для выбранного явления и самих исследуемых материалов, что исключает возможность создания единых представлений о веществе.

Следует отметить, что принимаемые упрощения для создаваемых представлений в узких областях существования вещества в тех или иных физических условиях могут совершенно не соответствовать реально существующим условиям и выбираться в силу необходимости создания корректной абстрактной математической задачи, решение которой приписывают интервалу существования вещества в рассматриваемом явлении. Однако альтернативные представления, соответствующие реально существующим физическим объектам, не рассматриваются из-за отсутствия возможности проведения теоретического анализа, что без учета создания приемлемого абстрактного математического аппарата ограничивает в настоящее время физические представления.

Другой характерной особенностью является использование аксиоматических представлений, которыми вынуждены подменять механизмы реализации тех или иных явлений в силу несовершенства представлений об образовании вещества. Понимание указанных особенностей приводит к постановке задач улучшения качества выбираемых для описания моделей за счет приближения их к реально происходящим явлениям или объектам исследования, их решению и соответственно уменьшению возникающих погрешностей при расчетах.

В качестве примера таких задач могут служить представленные решения, например, [3] и [4]. Однако решенные задачи уточнения физических объектов исследования, впрочем, как и иные аналогичные задачи, оказывались не востребованными в разделах физики, связанных с другими свойствами вещества, и фактически не повлияли на общепринятые представления, что можно объяснить отсутствием широкомасштабной теории вещества. При расширении представлений, в частности, в мезомеханике исследование нагруженного твердого тела предлагается проводить на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях [1]. Однако указанные уровни никак не связаны с физическими объектами, которые фактически и создают любое нагруженное или нагруженное твердое тело. Такими объектами являются электрон, ядро атома, атом, молекула [6], которая в случае монокристалла определяет само рассматриваемое тело. Предлагаемые в мезомеханике уровни не связаны с конкретными физическими объектами, и их размеры зависят от субъективного выбора, поэтому ее представления являются аксиоматическими. В определении понятия такого подхода [1] нагруженное твердое тело рассматривается как многоуровневая самоорганизующаяся система. Однако использование понятия «самоорганизация» фактически лишено смысла, поскольку до настоящего времени отсутствуют разъясне-

ния механизма ее реализации, несмотря на большое число публикаций с использованием этого термина, как для физических систем, так и для технологических процессов, в частности, деформационных процессов [3]. Вызывает сомнение и возможность существования каких-либо иных систем, кроме многоуровневых самоорганизующихся систем, в силу определенного смысла понятия «самоорганизация» и отсутствия представлений о механизме осуществления самоорганизации системы. Насыщена подобными неопределенными понятиями и термодинамика реальных процессов [2].

Таким образом, расширение существующих представлений может только препятствовать развитию технологий машиностроения. Уточнение этих представлений практически не сказывается на понимании природных явлений как единого целого окружающего нас мира. Тогда как пересмотр всех аксиоматических представлений должен привести не только к правильному пониманию изобретенных и освоенных технологий, но и созданию на основе пересмотренных представлений новых технологий, которые всегда будут укладываться в рамки этих представлений и не обуславливать указанную ситуацию, возникшую на рубеже веков, в будущем. В связи с изложенными представлениями можно утверждать, что перспективное направление развития машиностроения может быть связано только с пересмотром общепринятых физических представлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панин, В.Е. Основы физической мезомеханики / В.Е. Панин // Физ. мезомех. – 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 5 – 22.
2. Вейник, А.И. Термодинамика реальных процессов / А.И. Вейник. – Минск : Навука і тэхніка. 1991. – 576 с.
3. Макушок, Е.М. Самоорганизация деформационных процессов / Е.М. Макушок. – Минск : Навука і тэхніка. 1991. – 272 с.
4. Макушок, Е.М. Некоторые особенности металлической структуры и механизмы ее разрушения и соединения при тепловом и механическом воздействии / Е.М. Макушок, В.В. Харченко // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 1. – С. 148 – 155.
5. Харченко, В.В. Метод физического моделирования и его возможности / В.В. Харченко // Инженерно-физический журнал. – Т. 74. – № 5. – С. 167–170.
6. Макушок, Е.М. О моделях молекулы, их значении в развитии представлений об электропроводности и создании технологий снижения сопротивления материалов / Е.М. Макушок, В.В. Харченко // Теория и практика машиностроения. – 2003. – №2. – С. 17–20.
7. Мрочек, Ж.А. Особенности технологического процесса формообразования покрытий прессованием / Ж.А. Мрочек, В.В. Харченко // Машиностроение. – Минск, 2009. – Вып. 24, Т. 1. – С. 23–28.
8. Харченко, В.В. Адгезия как физическое явление, обусловленное свойствами материалов и энергетическими характеристиками процесса образования покрытий / В.В. Харченко, Ж.А. Мрочек // Машиностроение. – Минск, 2010. – Вып. 25. – С. 68–70.

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

В. А. Логвин

Белорусско-Российский университет, Могилев

Ж. А. Мрочек, А. С. Чернов

Белорусский Национальный технический университет, Минск

Сформулированы основные требования к ионно-плазменной обработке для изменения свойств поверхностей деталей.

Развитие машиностроения во многом определяется решением проблемы надежности подвижных сопряжений технических систем на основе подбора высокоэффективных материалов, методов обработки и построения технологий, выбора смазочных материалов и т.д. Основная тенденция заключается в повышении реализуемых скоростей, давлений, рабочих температур при одновременном росте надежности. Это невозможно без использования деталей, имеющих высокие физико-механические характеристики поверхностных слоев, которые в большинстве случаев ответственны за коррозионную и радиационную стойкость, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики изделий. Поскольку детали технических систем во многих случаях работают при высоких тепловых и механических нагрузках, в химически активных и абразивных средах, то необходимы высококачественные способы поверхностного проектирования изделий, имеющие следующие характеристики:

- экологическая безопасность;
- минимальное изменение геометрических размеров изделия;
- отсутствие коробления поверхностей;
- внедрение строго дозированных количеств имплантанта;
- максимальный диапазон концентраций имплантанта;
- условия процесса, исключаящие нежелательные примеси;
- простота управления процессом;
- высокая воспроизводимость получаемых структур материала;
- экономичность метода.

Для повышения эксплуатационных свойств материалов используются механические, термические, деформационно-термические и химико-термические способы упрочняющей обработки и легирования, что не всегда обеспечивает достаточно хорошую адгезию покрытий, и упрочнение происходит не только на поверхности, но и в объеме. Для защиты деталей от изнашивания и коррозии достаточно изменений физико-механических свойств материала поверхности, при этом основной объем материала испытывает незначитель-

ные разрушающие воздействия нагрузок и химически активных сред и не требует упрочнения или перестройки. Ужесточение требований к структуре и свойствам поверхностных слоев стимулировало развитие способов ионно-плазменной обработки, применение которых более целесообразно и экономически выгодно по сравнению с традиционными технологиями.

На сегодняшний день, одним из перспективных способов ионно-плазменной обработки является ионная имплантация – введение ионов в твердое тело бомбардировкой его поверхности ускоренными частицами, приводящее к проникновению их вглубь мишени. Внедрение становится существенным при энергии более одного кэВ. Движущиеся частицы в результате многократных столкновений постепенно теряют энергию, рассеиваются и в конечном итоге либо отражаются, либо останавливаются, распределяясь в объеме поверхностного слоя по глубине (рис. 1) [1, 2]. Ионная имплантация приобрела в последнее время большое значение не только как способ создания микроэлектронных устройств, но и как мощный универсальный метод упрочняющей обработки. Материалы, попадая в условия облучения высокоэнергетическими ионами, претерпевают значительные структурные превращения, которые обуславливают изменение их свойств.

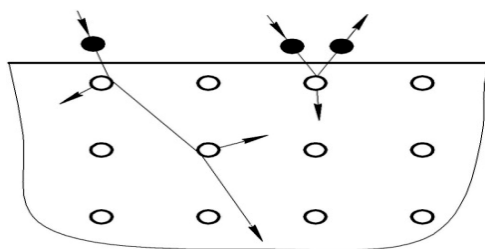


Рис. 1. Схема потерь энергии внедряющимся ускоренным ионом

Использование ионной имплантации позволяет формировать новые структурно-фазовые состояния с высокой плотностью дефектов, которые меняют физико-механические и химические свойства, поверхностного слоя, определяющие служебные характеристики материалов. При имплантации материалов следует учитывать нелинейные эффекты нарушения трансляционной симметрии кристаллических решеток во время бомбардировки поверхности твердых тел заряженными частицами, что и предлагает гипотеза, базирующаяся на идее возбуждения нелинейных колебаний в кристаллических решетках, которые приводят к действию процессов самоорганизации в ионной подсистеме [3]. Изменяя сорт внедряемых ионов, дозу ионного облучения, температуру образца-мишени, скорость набора дозы, удастся получать насыщенные и пересыщенные твердые растворы, метастабильные или аморфные состояния материалов поверхностного слоя.

Часто прибегают к одновременной имплантации ионов различных элементов периодической таблицы. Это связано с повышением адгезии между

слоями материалов, которые в природе плохо взаимодействуют в чистом виде. При этом в подслое ионно-имплантированных металлических образцов формируется дислокационная структура как результат деформационных процессов, протекающих в ходе ионной имплантации и в последующий за ионной имплантацией промежуток времени. Подобные процессы вызываются напряжениями, которые генерируются как в самом приповерхностном слое, так и инжектируются из поверхностного слоя, вследствие релаксации как статических напряжений, связанных с изменением объема поверхностного слоя, так и динамических напряжений, инициируемых при внедрении ионов в образец-мишень.

Рассмотрение динамического воздействия ионного потока на кристаллической мишени в виде беспорядочного «ионного дождя», выполнено с помощью компьютерного моделирования процесса релаксации в трехмерных кристаллических решетках после внешнего низкоэнергетического воздействия излучения тлеющего разряда [3]. Атомы на поверхности образца-мишени получают случайные по величине и направлению импульсы от бомбардирующих поверхность ионов. Переданная атомам образца-мишени энергия оказывается меньше пороговой энергии, которая необходима для образования точечных дефектов, но достаточна для возбуждения нелинейных колебаний в ионной подсистеме решетки. Когда нелинейные колебания прекращаются, атомы стабилизируются в новых позициях. Время стабилизации на несколько порядков выше, чем время обычных атомных релаксаций. В результате формируются новые долгоживущие метастабильные структурные состояния кристаллической решетки. Образуется целый спектр новых коллективных состояний атомов в решетках после затухания нелинейных колебаний. Однако конкретный вид этих новых гетерогенных структур зависит от потенциала, характеризующего связи между атомными осцилляторами, и величины внешнего возбуждения. В частности, для потенциала Морзе с параметрами нелинейности, рассчитанными для α -Fe, показано, что после внешнего низкоэнергетического воздействия излучения тлеющего разряда в нелинейных решетках образуются перемещающиеся солитоны, аналогами которых могут являться дислокации [3].

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Комаров, Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы / Ф.Ф. Комаров. – М. : Металлургия, 1990. – 216 с.
- 2 Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов / А.В. Белый, В.А. Кукареко, О.В. Лободаева [и др.]. – Минск : Физико-технический институт, 1998. – 220 с.
- 3 Long-Range Effect and Self-Organization Processes Induced by Low-Energy Ion Irradiation in Solids / I.V. Tereshko, V.I. Khodyrev, V.V. Glushchenko [et al.] // Interaction of Radiation with Solids, Proceed, of Third Inter. Conf.-Minsk, Belarus, 1999. – Part. 1. – P. 37 – 39.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Ю. В. Синькевич, А. А. Гриневич, И. Н. Янковский
Белорусский национальный технический университет, Минск

Приведены методика и результаты исследования профилограмм электроимпульсно полированных поверхностей образцов из сталей 10 и 20Х13 с помощью корреляционного преобразования. Установлено, что в процессе полирования формирование топографии поверхности происходит за счет одновременного с равной вероятностью и равной интенсивностью сглаживания микро- и субмикронеровностей поверхности.

Известно, что в структуру шероховатости поверхности входят как закономерные, так и случайно расположенные неровности [1, 2]. Поэтому реальный профиль поверхности, полученный в результате ее обработки различными методами, представляет собой композицию систематической и случайной составляющих. Систематическая составляющая профиля обусловлена факторами, постоянно действующими в процессе обработки, и представляет собой основные микронеровности, которые на поверхности расположены определенным образом. Случайная составляющая образуется за счет воздействия различных нерегулярных технологических и физических факторов и накладывается на поверхность основных микронеровностей. Она имеет вероятностный характер и является реализацией случайной стационарной функции [2].

Механизм формирования топографии поверхности при электроимпульсном полировании (ЭИП) достаточно сложен, включает в себя физические, химические, геометрические и технологические аспекты, которые взаимосвязаны и на сегодняшний день мало изучены.

Цель работы – исследование вероятностно-статистическими методами механизма формирования топографии поверхности в процессе ЭИП путем корреляционного преобразования профилограмм поверхности.

В качестве объектов исследования были выбраны углеродистая конструкционная сталь 10 и коррозионно-стойкая сталь 20Х13 в виде плоских образцов, которые предварительно шлифовались до уровня Ra 1,3... 1,4 мкм и 0,53... 0,63 мкм. Образцы из стали 10 полировали в 2 %-ном водном растворе хлористого аммония, из стали 20Х13 – в 6 %-ном водном растворе сернокислого аммония при напряжении 300 ± 5 В и температуре электролита 85 ± 1 °С. До и после ЭИП на профилографе-профилометре Talysurf-5 фирмы Rank Taylor Hobson (Англия) снимались профилограммы поверхности образцов и измерялись параметры шероховатости Ra и Rq .

Поскольку коррелограмма профиля поверхности, содержащего систематическую и случайную составляющие, является композицией коррелограмм систематической и случайной составляющих, то она позволяет получать характеристики, как совокупного профиля поверхности, так и отдельно периодической и случайной составляющих [3]. Расчет значений корреляционной функции $K(\tau)$ производился по преобразованной для обработки профилограмм формуле [4]:

$$K(\tau) = K_{\beta}(\tau) + K_{\gamma}(\tau) = \frac{1}{l - \tau} \sum_0^{l-\tau} (y(x) - m_y)(y(x + \tau) - m_y),$$

где τ – переменная разность между абсциссами двух сечений профилограммы, мкм; l – длина профилограммы, мкм; $y(x)$; $y(x + \tau)$ – ординаты профилограммы в выбранной системе координат, мкм; m_y – среднее арифметическое значение ординат профилограммы, мкм.

Для характеристики доли случайной составляющей в реальном профиле поверхности использовали коэффициент случайности профиля γ , равный [3]:

$$\gamma = \frac{Rq_{\gamma}^2}{Rq^2},$$

где Rq – среднее квадратическое отклонение профиля; Rq_{γ} – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей профиля.

Для автоматизированной компьютерной обработки профилограммы предварительно переводились в цифровой формат путем сканирования. С полученных оцифрованных изображений в программе Paint.NET v. 3.35 удалялись линии сетки профилограмм и артефакты изображений. Таким образом, перед анализом на изображении профилограммы оставался только характерный для данного образца участок линии профиля поверхности. Для математической обработки полученных изображений и построения графиков использовался программный пакет Matlab [5] и написанная в пакете программа. Импорт оцифрованных изображений профиля производилось с помощью Matlab Image Processing Toolbox [5]. В результате изображение профиля поверхности трансформировалось в матрицу, размеры которой были равны размеру изображения в пикселях. Значения τ последовательно принимались равными 0; 1; 2; ...; Δx . В нашем случае было принято $\Delta x = 1$ пиксель. Размер одного пикселя равнялся 0,847 мкм. После получения матрицы по ней последовательно производился отсчет ординат профиля поверхности относительно выбранной линии отсчета, расчет значений корреляционной функции и сглаженной гистограммы профиля, а также параметра Ra .

Аппроксимация построенных коррелограмм производилась с помощью *Curve Fitting Tool* пакета Matlab [5] функцией, позволяющей учесть

систематические неровности, как с большим, так и с малым шагом и имеющей вид [6]:

$$K(\tau) = c^2 Ra^2 [\gamma e^{-\alpha\tau} + \beta \cos\left(\frac{2\pi}{T_\beta}\tau\right) + \nu \cos\left(\frac{2\pi}{T_\nu}\tau\right)],$$

где α – коэффициент частотного состава случайных неровностей; β и ν – коэффициенты высот систематических неровностей соответственно с периодами T_β и T_ν ; c – коэффициент, зависящий от формы неровностей и закона их распределения по высоте (принимался равным $\sqrt{\pi/2}$ [6]).

В результате математической обработки профилограмм для каждой из них были построены коррелограммы, спектрограммы, сглаженные гистограммы и графики зависимостей коэффициентов корреляционной функции от продолжительности ЭИП.

Анализ полученных результатов показал, что в структуре исходной шероховатости значительное место занимают высокочастотные как случайные, так и систематические неровности с периодом до 200 мкм. При последовательном анализе спектрограмм видно, что амплитуды неровностей вне зависимости от их периода убывают по мере увеличения продолжительности ЭИП. Рост коэффициента β свидетельствует о том, что во всех случаях наблюдается увеличение шагов систематических неровностей, и повышение влияния низкочастотных неровностей на совокупную шероховатость поверхности. После 10 мин полирования происходит выделение одной или двух преобладающих низкочастотных гармоник с периодами от 180 до 600 мкм. Суммарный вклад этих гармоник в величину среднеквадратического отклонения профиля поверхности достигает 69%. Неровности с мелким шагом и малой амплитудой постепенно уменьшаются и после 5...15 мин ЭИП практически исчезают из структуры шероховатости. Данное изменение структуры неровностей может быть объяснено равно вероятным и равно интенсивным съемом металла со всей поверхности в процессе ЭИП.

При увеличении продолжительности полирования до 5...10 мин происходит плавное снижение уровня случайной составляющей, характеризующееся уменьшением коэффициента случайности профиля γ . Профиль становится более однородным и периодичным. На промежутке от 10 до 15 мин обработки наблюдается рост уровня случайной составляющей и значительное замедление темпа снижения шероховатости. Последний факт можно объяснить проявлением микроструктуры на поверхности образцов за счет более интенсивного разрушения металла на границах зерен. Анализ зависимости коэффициента α от продолжительности обработки показал, что за первую минуту при ЭИП стали 10 с $Ra_{исх}$ 0,63 и 1,3 мкм и стали 20X13 с $Ra_{исх}$ 0,53 и 1,4 мкм его значение снизилось в среднем соответственно на 52; 60; 56 и 29%. Увеличение времени ЭИП приводит к умень-

шению достигнутого значения коэффициента α на промежутках 1...3 мин для стали 10 и 1...7 мин для стали 20Х13 с $Ra_{исх}$ 0,53 мкм. Дальнейшая обработка приводит к росту коэффициента α . Для стали 20Х13 с $Ra_{исх}$ 1,4 мкм снижение коэффициента α происходит во всем исследованном диапазоне продолжительности полирования. Следовательно, в процессе ЭИП случайные неровности так же, как и систематические постепенно сглаживаются, шаг между ними увеличивается и происходит это до тех пор, пока не начинает проявляться микроструктура поверхности.

Таким образом, в процессе ЭИП независимо от исходной шероховатости и вида обрабатываемого материала формирование топографии поверхности происходит за счет одновременного с равной вероятностью и равной интенсивностью сглаживания микро- и субмикронеровностей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Dagnall, M.A. Exploring surface texture / M.A. Н. Dagnall. – LEICESTER, ENGLAND: RANK TAYLOR HOBSON, 1980. – 170 p.
2. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов; под ред. А.А. Первозванского. – М. : Наука, 1975. – 344 с.
3. Витенберг, Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки / Ю.Р. Витенберг. – Л. : Судостроение, 1971. – 101 с.
4. Расчет и построение коррелограмм уплотняющих поверхностей деталей судовой арматуры / Г.С. Беляев [и др.] // Судостроение. – 1971. – № 6. – С. 46–49.
5. Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
6. Витенберг, Ю.Р. Оценка шероховатости с помощью корреляционных функций / Ю.Р. Витенберг // Вестник машиностроения. – 1969. – № 1. – С. 55–57.

УДК 621.923.7

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ

Ю. В. Синькевич

Белорусский национальный технический университет, Минск

Приведены результаты исследования распределения микротвердости в поверхностном слое сталей 20, У8А и 20Х13 после электроимпульсного полирования. Установлено, что электроимпульсное полирование не изменяет микротвердость поверхностного слоя отожженной стали 40Х13 и сталей У8А и 40Х13, подвергнутых закалке с последующим отпускком.

Твердость поверхности является одним из важнейших физико-механических свойств металлов и сплавов и оказывает значительное влия-

ние на эксплуатационные характеристики деталей машин [1]. Известно [2], что электрохимическое полирование изменяет физико-механические свойства обрабатываемой поверхности, в частности уменьшает ее твердость.

В настоящее время в литературе отсутствуют данные о распределении микротвердости по нормальному сечению к поверхности после электроимпульсного полирования, получившего широкое промышленное применение. Поэтому были проведены исследования распределения микротвердости в поверхностном слое после электроимпульсного полирования образцов, изготовленных из сталей 20, У8А и 40Х13. Для устранения возможного влияния неоднородности физико-механических свойств поверхностного слоя на распределение микротвердости, а также с целью исследования влияния вида предварительной термообработки на распределение микротвердости после электроимпульсного полирования все образцы перед полированием прошли соответствующую термообработку (табл. 1) согласно рекомендациям [3].

Таблица 1

Режимы термообработки образцов

Вид и режимы термообработки	Марка стали		
	20	У8А	40Х13
Отжиг: - температура нагрева, °С - время выдержки, мин - охлаждение	905 30 с печью	740 30 с печью	800 30 с печью
Нормализация: - температура нагрева, °С - время выдержки, мин - охлаждение	— — —	750 20 на воздухе	— — —
Закалка: - температура нагрева, °С - время выдержки, мин - охлаждение	— — —	780 15 в воде	1050 10 в масле
Отпуск: - температура нагрева, °С - время выдержки, мин - охлаждение	— — —	300 25 на воздухе	300 25 на воздухе

После термообработки для удаления дефектного поверхностного слоя образцы шлифовались на чистовых режимах на плоскошлифовальном станке, после чего они полировались в течение 8 мин при напряжении 300 В и температуре электролита 70 °С. Для полирования образцов из сталей 20 и У8А использовали 1,5 % водный раствор хлористого аммония, из стали 40Х13 – 4,5 % водный раствор сернокислого аммония. В процессе полирования был полностью удален дефектный поверхностный слой, оставшийся после шлифования. Микротвердость поверхностного слоя измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду 1 Н по методике «косо́го шлифа» с соблюдением требований ГОСТ 9450–76. Использование

данной методики позволило увеличить в 30 раз протяженность исследуемой зоны, повысить точность и снизить трудоемкость измерений.

Распределение микротвердости в поверхностном слое по нормальному сечению к поверхности показано на рисунке 1.

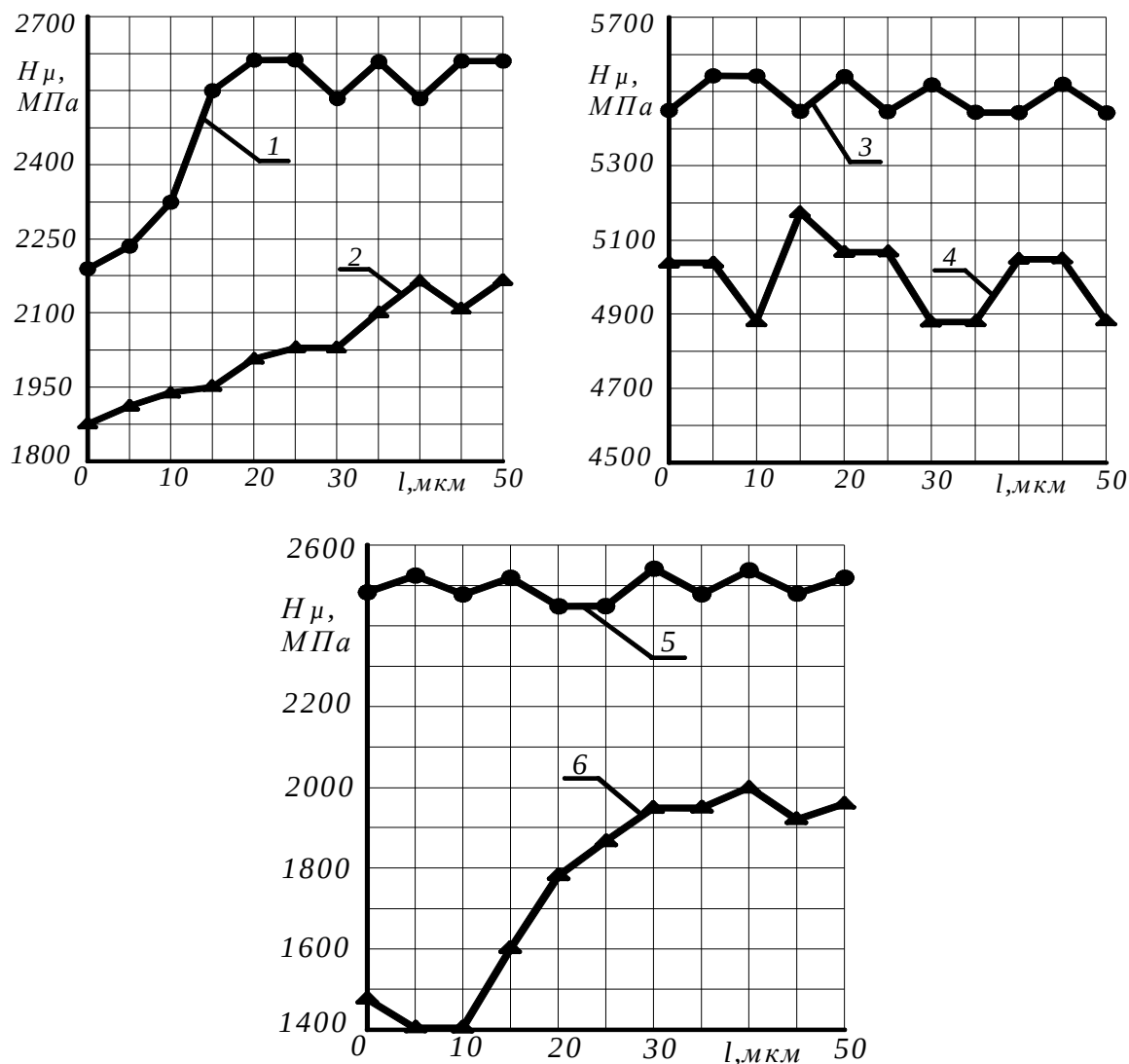


Рис. 1. Распределение микротвердости по нормальному сечению:

1, 2, 3 – нормализованная, отожженная и закаленная + отпущенная сталь У8А;
4, 5 – закаленная + отпущенная и отожженная сталь 40Х13; 6 – отожженная сталь 20

Анализ полученных данных показал, что электроимпульсное полирование не изменяет микротвердость поверхностного слоя отожженной стали 40Х13 и сталей У8А и 40Х13, подвергнутых закалке с последующим отпуском. Однако, после полирования образцов из нормализованной стали У8А установлено снижение микротвердости поверхностного слоя на 150... 300 МПа на глубину до 15 мкм. Более глубокое изменение микротвердости установлено для отожженной стали У8А, для которой микротвердость снизилась на 50... 230 МПа на глубину до 35 мкм. Наибольшее снижение мик-

ротвердости поверхностного слоя установлено для образцов из отоженной стали 20. В этом случае микротвердость снизилась на 100... 500 МПа на глубину до 25 мкм.

Снижение микротвердости при электроимпульсном полировании углеродистых сталей в электролите, содержащем хлористый аммоний, происходит из-за обезуглероживания поверхностного слоя, и большое значение при этом играет микроструктура сплава. Электролит, содержащий сернокислый аммоний, не вызывает обезуглероживания поверхностного слоя у коррозионно-стойкой стали и снижения его микротвердости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баршай, И.Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей машин при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом: монография / И.Л. Баршай. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 244 с.
2. Грилихес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов / С.Я. Грилихес. – Л. : Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Фиргер, И.В. Термическая обработка сплавов / И.В. Фиргер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 304 с.

УДК 621.762:71

СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА ОБРАБОТАННОГО ИОНАМИ АЗОТА СПЛАВА Fe_3Al

А. В. Белый

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

В. А. Кукареко

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Н. Н. Попок, С. В. Дербуш, Е. И. Ракель

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Исследовано структурное состояние, триботехнические свойства и коррозионная стойкость обработанного ионами азота сплава Fe_3Al . Установлено, что максимальная износостойкость и сопротивление коррозии в кислой агрессивной среде модифицированного сплава Fe_3Al достигается при режимах обработки, обеспечивающих выделение в поверхностном слое наноразмерных частиц нитридов AlN с кубической решеткой типа $NaCl$.

Сплав Fe_3Al , обладающий высокой удельной прочностью и жаростойкостью, является перспективным материалом для изготовления деталей современных энергонасыщенных машин. Вместе с тем сплав Fe_3Al не обладает требуемыми характеристиками износо- и коррозионностойкости. Перспективным методом повышения свойств материалов является имплантация ио-

нами азота [1]. В задачу работы входило исследование структурных превращений в сплаве Fe_3Al при ионно-лучевом азотировании, а также изучение износо- и коррозионной стойкости модифицированных слоев.

Исследование проводилось на образцах ($8 \times 6 \times 6$ мм), вырезанных из отливки сплава Fe_3Al (Fe – 74,90; Al – 24,93; Zr – 0,15; В – 0,02 ат. %). Ионно-лучевая обработка азотом осуществлялась при температурах 670 – 870 К. Плотность ионного тока составляла 2 мА/см^2 , доза ионов $\approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Рентгеноструктурный анализ выполнялся на приборе ДРОН-3 в CoK_α излучении. Микротвердость $H_{0,49}$ определялась на приборе ПМТ-3. Триботехнические испытания проводили на трибометре АТВП в условиях трения без смазки (давление $p = 1,5 \text{ МПа}$). В качестве контртела использовалась пластина из закаленной стали У8 ($HV = 8000 \text{ МПа}$). Скорость перемещения образца относительно контртела составляла $\approx 0,1 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$. Коррозионные испытания образцов сплава Fe_3Al проводились в 2Н водном растворе уксусной кислоты (CH_3COOH) и в 10 % водном растворе NaCl с использованием метода взвешивания после выдержки в течение 25, 100, 250 и 500 ч.

В исходном состоянии сплав Fe_3Al имеет ГЦК решетку ($\text{Fm}\bar{3}\text{m}$) с параметром $a = 0,5793 \text{ нм}$. Размер зерна сплава составляет $D_z = 100 - 300 \text{ мкм}$. Твердость сплава $HV = 3200 \text{ МПа}$. В результате обработки сплава Fe_3Al ионами азота при 670 К на его поверхности формируется азотированный слой толщиной 3 – 5 мкм и с микротвердостью 7000 МПа. В слое регистрируется выделение нитридных частиц $c_1\text{-AlN}$ с кубической ($\text{Fm}\bar{3}\text{m}$) решеткой, изоморфной решетке матричной интерметаллидной фазы Fe_3Al . Параметр решетки фазы $c_1\text{-AlN}$ (структурный тип NaCl) составляет $a = 0,3955 \text{ нм}$ (рис. 1, а).

Повышение температуры ионно-лучевой обработки до 720 и 770 К приводит к возрастанию микротвердости слоя до 13200 и 12800 МПа, соответственно, и к выделению в слое комплекса частиц нитридов алюминия AlN с кубической решеткой $\text{Fm}\bar{3}\text{m}$ ($c_1\text{-AlN}$, $c_2\text{-AlN}$ и $c_3\text{-AlN}$) и частиц $h\text{-AlN}$ (структурный тип вюрцит) с гексагональной решеткой $\text{P}\bar{6}_3\text{mc}$ (рис. 1, б). Выделившиеся нитриды $c_1\text{-AlN}$, $c_2\text{-AlN}$ и $c_3\text{-AlN}$ имеют одинаковый структурный тип кристаллической решетки (NaCl), но отличаются значениями параметра a , что связано как с дефицитом азота, так и дефицитом атомов алюминия. После обработки сплава при 820 К толщина слоя увеличивается до 13 – 15 мкм. В слое уменьшается содержание кубических нитридов $c\text{-AlN}$ и увеличивается концентрация гексагонального нитрида $h\text{-AlN}$. Микротвердость поверхностного слоя сплава при этом снижается и составляет $H_{0,49} = 12400 \text{ МПа}$.

Имплантация сплава Fe_3Al при 870 К приводит к образованию слоя толщиной 15 – 18 мкм и твердостью $H_{0,49} = 10300 \text{ МПа}$. Основной нитридной фазой, образующейся в имплантированном слое, является нитрид $h\text{-AlN}$ (рис. 1, в). Кроме этого в слое регистрируется присутствие небольшого количества дисперсных частиц кубического нитрида $c_2\text{-AlN}$.

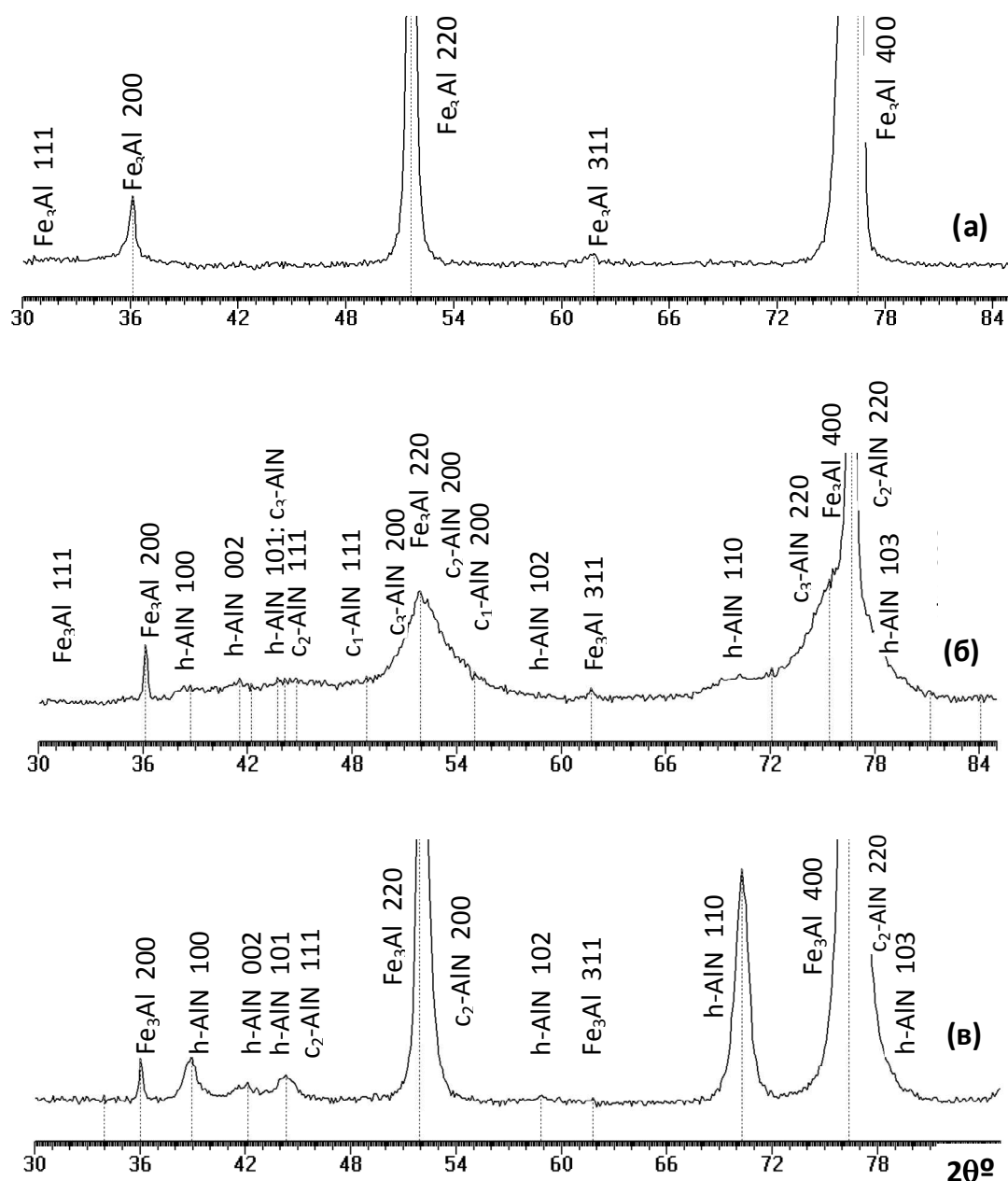


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($\text{CoK}\alpha$) от поверхностных слоев сплава Fe_3Al , прошедшего обработку по различным режимам: а) исходное состояние; б) обработка N^+ при 770 K; в) то же при 870 K.

На рисунке 2 приведен график зависимости интенсивности весового изнашивания I_q сплава Fe_3Al от режима его ионно-лучевой обработки. Ионная обработка при 720 – 770 K приводит к снижению интенсивности изнашивания сплава в 25 – 28 раз по сравнению с его исходным состоянием. При этом в слое регистрируется преимущественное выделение частиц кубических нитридов c-AlN . Образование в азотированном слое частиц гексагонального нитрида h-AlN в процессе обработки при 820 – 870 K сопровождается некоторым снижением износостойкости модифицированного слоя.

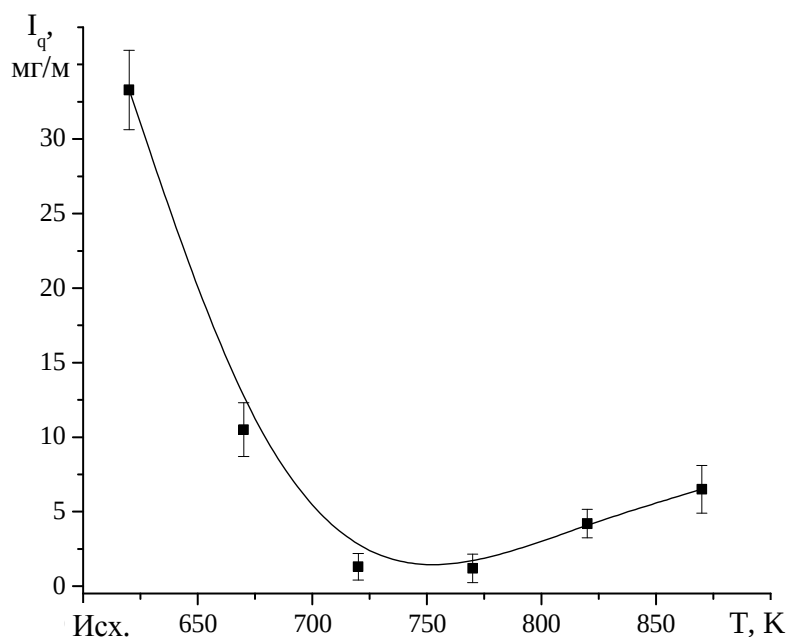


Рис. 2. Зависимость интенсивности весового изнашивания I_q сплава Fe_3Al от режима его ионно-лучевой обработки

Данные по коррозионной стойкости сплава в различных средах приведены на рисунке 3. Можно видеть, что в случае испытаний сплава в кислой агрессивной среде максимальная коррозионная стойкость достигается после обработки при 720 – 770 К, обеспечивающей выделение в слое частиц кубических нитридов $\epsilon-AlN$. При испытаниях в нейтральном соляном растворе установлено, что ионно-лучевое азотирование сплава Fe_3Al приводит к снижению его коррозионной стойкости (рис. 3, б).

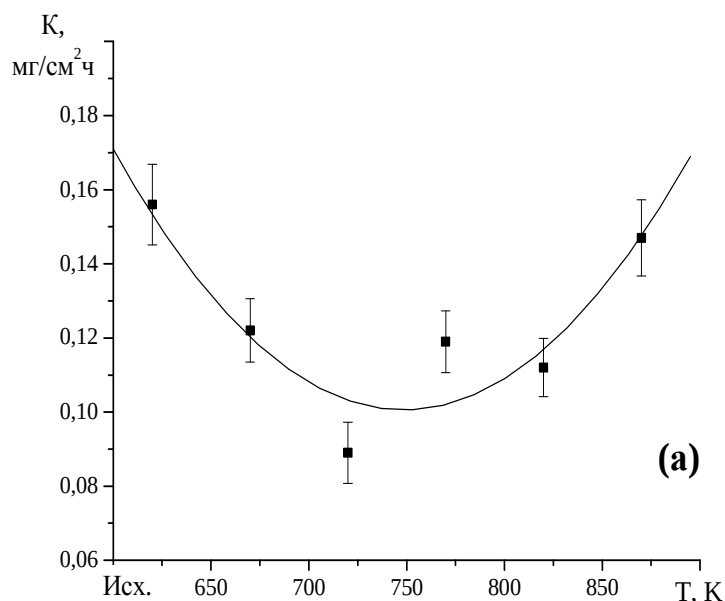


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии K сплава Fe_3Al , обработанного ионами азота по различным режимам, при испытаниях в 2Н водном растворе CH_3COOH (а) и 10% водном растворе $NaCl$ (б) (см. также с. 77)

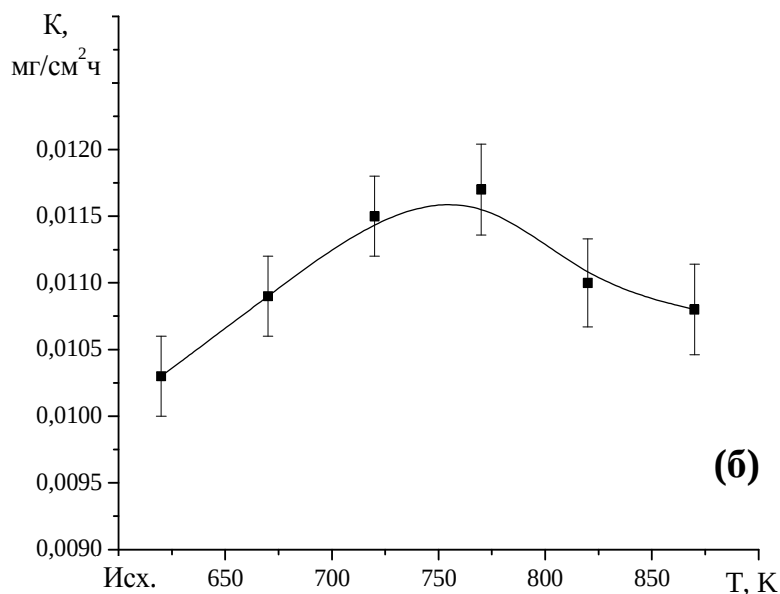


Рис. 3 Окончание

ЛИТЕРАТУРА

1. Белый, А.В. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А.В. Белый, В.А. Кукареко, А. Патеюк. – Минск : Белорусская наука, 2007. – 244 с.

УДК 621.762:621.921

ПРОИЗВОДСТВО ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРНЫХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

П.А. Витязь, В.Т. Сенють, И.В. Валькович

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

М.Л. Хейфец

ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск

Разработаны технологии производства инструментов с пластинами из сверхтвердых материалов, включающие синтез наноструктурных порошков и спекание поликристаллов из порошков.

Практика использования инструментов показывает, что в ряде случаев целесообразно использовать сверхтвердые материалы (СТМ) в виде компактных материалов, содержащих частицы СТМ, спеченные без добавок связующего в поликристаллические блоки. Это обуславливает актуальность разрабатываемых технологических основ синтеза наноструктурных СТМ и их последующего компактирования без связующего [1, 2].

Разработку технологии получения порошков СТМ с использованием наноалмазов осуществляли:

- при синтезе частиц алмаза и КНБ субмикронных и микронных размеров из графита и гексагонального нитрида бора (ГНБ) с использованием ультрадисперсных алмазов (УДА) в качестве активатора процесса синтеза;

- при синтезе поликристаллических частиц субмикронных и микронных размеров с применением наноалмазов, модифицированных тонким поверхностным слоем неалмазного углерода [3].

В первом случае получение порошков СТМ связано с фазовым превращением в отдельных частицах графита и ГНБ, инициируемым УДА, во втором случае фазовое превращение происходит в тонком слое неалмазного углерода на поверхности УДА с последующим спеканием УДА в более крупные частицы.

Основные этапы технологии:

1. *Модифицирующий отжиг порошка наноалмазов.* Проводится в условиях защитной атмосферы (водород, дисаммиак) с целью удаления адсорбированных и хемосорбированных кислородсодержащих групп, воды и замены их на водородсодержащие соединения, что позволяет защитить частицы УДА от графитизации в условиях высоких температур и низкого давления. Отжиг проводится в диапазоне температур 800 – 1000 °С в течение 2 – 4 часов. Отжигу подвергаются как очищенные от неалмазного углерода УДА, так и УДА с неалмазным углеродом на поверхности частиц.

2. *Приготовление шихты на основе наноалмазов и неалмазных форм углерода (нитрида бора).* В зависимости от вида получаемых частиц производится механическое смешивание очищенного порошка УДА и порошка графита (ГНБ) либо смешивание очищенного порошка УДА с порошком УДА, модифицированным тонким слоем неалмазного углерода в баночном смесителе в течение 1 – 2-х часов. Модифицирование УДА неалмазными формами углерода производится путем отжига порошка УДА либо алмазсодержащей шихты в условиях вакуума при температуре 1100 – 1200 °С при выдержке на заданной температуре в течение 45 мин.

3. *Термобарическая обработка (синтез) шихты в условиях высоких давлений и температур.* Синтез порошков осуществляется в аппарате высокого давления (АВД) в диапазоне давлений 2 – 4 ГПа при температуре в диапазоне 1200 – 1350 °С. Синтез поликристаллических частиц на основе УДА осуществляется при более низких технологических параметрах: давление 2 ГПа, температура 1200 – 1250 °С. Синтез алмаза и КНБ из графита и ГНБ с применением УДА происходит при более высоких

режимах: давление 4 ГПа, температура 1300...1350°C. Длительность синтеза в обоих случаях составляет 30 с.

4. *Механическое диспергирование спека после синтеза.* Дробление полученного спека осуществляется путем его раздавливания в пресс-форме усилием 100 МПа и последующего размола в баночном смесителе до получения однородного порошка.

5. *Химическая очистка от остаточных неалмазных форм углерода (нитрида бора).* Химическая очистка заключается в удалении остаточных (непрореагировавших) частиц графита (ГНБ), неалмазных форм углерода, а также дисперсных образований УДА, которые затруднительно использовать в дальнейшем при получении композиционных и поликристаллических материалов. Удаление углерода производится путем кипячения продуктов размола в смеси азотной и концентрированной серной кислот, взятых в соотношении 3:1 по массе с добавлением бихромата калия. ГНБ удаляется путем обработки продуктов размола в расплаве КОН.

6. *Классификация порошка с помощью ситового метода или седиментацией в жидкости.* В зависимости от дисперсности полученных частиц для их классификации может быть использован ситовый метод (для частиц свыше 40 мкм) и седиментация порошка в жидкости (в воде) для разделения микропорошков.

На основе синтезированных порошков алмаза и кубического нитрида бора путем спекания в условиях высоких давлений и температур получают поликристаллические блоки для лезвийной обработки сплавов цветных металлов, керамики, сталей и чугунов.

Технологии получения поликристаллов включают следующие основные этапы:

1. *Химическое модифицирование порошков СТМ.* На стадии газофазного химического модифицирования осуществляется удаление с поверхности частиц влаги, кислородсодержащих соединений, а также нанесение на поверхность частиц активаторов спекания и компонент связующего. Модифицирование осуществляется в атмосфере дисаммиака в диапазоне температур 800 – 1000 °С, время выдержки на заданной температуре составляет 2 – 4 часа. Для модифицирования порошков алмаза используется Со в качестве катализатора-растворителя, а также Ti, В, Si в качестве карбидообразующих элементов. Порошки КНБ перед спеканием модифицировали Al.

2. *Термобарическая обработка порошка в условиях высоких давлений и температур.* Компактирование порошков осуществляется в АВД, в котором проводится синтез порошков СТМ. В данном случае используются более высокие давление и температура: при спекании

алмазных порошков применяется давление 5...7 ГПа, температура составляет 1600...2200 °С, спекание КНБ осуществляется при давлении 4...6 ГПа и температуре 1400...2000 °С. Выдержка при заданной температуре производится в течение 15...30 с.

3. *Химическая очистка от примеси остаточных неалмазных форм углерода (нитрида бора).* Очистка алмазных поликристаллов производится путем их обработки в кислотах путем кипячения, поликристаллы на основе КНБ подвергаются обработке в расплаве щелочи.

4. *Контроль физико-механических свойств поликристаллов.* Полученные образцы контролируются визуально с помощью оптического микроскопа на предмет наличия поверхностных дефектов, пор, трещин. Контроль – 100 %.

5. *Механическая обработка поликристаллов.* После операции контроля осуществляется механическая обработка образцов с помощью алмазных чашечных кругов с целью придания им необходимых геометрических размеров, углов. Полученные поликристаллические блоки могут крепиться на державку механически либо с помощью пайки.

По разработанным технологиям синтезированы поликристаллические СТМ на основе КНБ и алмаза, из которых изготовлены режущие пластины для лезвийной обработки материалов.

Разработаны технологии получения наноструктурных СТМ с использованием наноалмазов, включающие различные варианты. В первом случае синтез частиц алмаза и КНБ субмикронных и микронных размеров из графита и ГНБ происходит с использованием наноалмазов в качестве активатора процесса синтеза. Во втором случае осуществляют получение поликристаллических частиц субмикронных и микронных размеров на основе наноалмазов, модифицированных тонким поверхностным слоем неалмазного углерода. Спроектированы технологии синтеза наноструктурных порошков алмаза и кубического нитрида бора. По разработанным технологиям синтезированы поликристаллические СТМ на основе КНБ и алмаза, изготовлены режущие пластины для лезвийной обработки сплавов цветных металлов, керамики, закаленных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь и др. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 522 с.
2. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 283 с.
3. Витязь, П.А. Синтез и применение сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, В.Д. Грицук, В.Т. Сенюць. – Минск: Беларус. навука, 2005. – 359 с.

СОЗДАНИЕ НОВЫХ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

**А. И. Гордиенко, В. В. Ивашко, И. И. Вегера,
А. И. Михлюк, И. А. Хайтин**

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

Рассматриваются новые производственные технологии индукционного нагрева, применяемые для поверхностной термообработки деталей и нагрева полуфабрикатов под деформацию.

В настоящее время в суммарном потреблении тепло- и энергоресурсов предприятиями промышленности Беларуси доля производств с применением операций нагрева в газовых, электрических печах и индукционных установках составляет свыше 10 %, причем процессы с использованием индукционного нагрева занимают менее 1 %. Устройства, в которых применяется индукционный нагрев, имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными нагревательными устройствами. Это, прежде всего, высокий КПД (90 – 97 %), компактность индукционных установок, что позволяет встраивать их в линии механической обработки, высокая производительность операций нагрева, формирование на поверхности деталей термически упрочненных слоев, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик и специальных свойств. Следует отметить, что индукционный нагрев чаще всего применяют при проведении операцийковки, штамповки, прессования, объемной и поверхностной термической обработки металлов и сплавов [1].

Термообработка при индукционном нагреве более экономична и менее трудоемка и по качеству готовых изделий не уступает, а в ряде случаев и превосходит процессы печной обработки. При индукционном нагреве резко сокращаются время нагрева, окисление и обезуглероживание поверхности деталей, снижается коробление деталей при закалке, что позволяет существенно уменьшить припуски на механическую обработку. При поверхностной индукционной закалке вместо цементации в сотни раз сокращается длительность процесса, снижается трудоемкость и стоимость упрочнения, в несколько раз снижаются затраты электроэнергии, отпадает необходимость использования природного газа, минеральных масел, асбеста,

жаропрочных и жароупорных материалов, предотвращаются выбросы в окружающую среду применяемых вредных веществ и продуктов их распада.

Однако необходимо отметить, что темпы расширения области применения индукционного нагрева сдерживаются проблемами приобретения современного оборудования, необходимостью разработки или корректировки технологических процессов, позволяющих обеспечить высокое качество выпускаемой продукции и снижение себестоимости. Не менее остро для республики стоят проблемы замены или модернизации оборудования, нагревательных устройств, совершенствования технологических процессов термической обработки.

На сегодняшний день на промышленных предприятиях Республики Беларусь в наличии находится и используется более 1000 индукционных установок, причем около 70 % из них имеют 100 %-ный износ. Поэтому в настоящее время перед промышленными предприятиями стоит очень важная задача по модернизации и замене имеющегося индукционного оборудования, выработавшего свой ресурс. При этом речь должна идти не о замене физически изношенного, а о приобретении современного оборудования нового поколения, к которому относятся установки на транзисторных или тиристорных модулях. Они имеют более высокий КПД (выше 95 %) по сравнению с машинными (КПД 75 %) и ламповыми (КПД 70 %), меньшие размеры (от 1/3 до 1/10 объема ламповых генераторов), большой срок службы силовых транзисторов и тиристорных (при сроке службы генераторных ламп от 4000 до 6000 часов), низкий расход охлаждающей воды. Второй не менее важной задачей является разработка новых перспективных технологий индукционной термической обработки различных деталей и заготовок для замены устаревших энергозатратных технологий печного нагрева с использованием природного газа [2].

Для решения этих задач авторским коллективом на протяжении последних лет проделана огромная работа. В рамках ГППНИ «Металлургия» был проведен мониторинг наличия, технического состояния и применения оборудования индукционного нагрева более чем на 60-и предприятиях Республики Беларусь, а также изучена потребность этих предприятий в модернизации и приобретении нового оборудования. Кроме того, сделан обзор современного оборудования индукционного нагрева отечественного и импортного производства, по итогам которого было показано, что при замене существующих физически и морально устаревших ламповых и машинных преобразователей ТВЧ на транзисторные или тиристорные только за счет экономии электроэнергии при работе на холостом ходу и под нагрузкой срок окупаемости нового оборудования составляет от 1,5 до 3 лет.

Разработаны рекомендации по выбору индукционного оборудования, описаны методики расчета преобразователей, созданы методики по расчету, проектированию и изготовлению индукторов, обладающих высоким КПД. Для разработки новых технологий индукционной обработки машиностроительных деталей и различных полуфабрикатов изучены особенности механизма и кинетики фазовых и структурных превращений, процессов рекристаллизации и фазовой перекристаллизации высокопрочных сталей и сплавов, их механические и эксплуатационные свойства в зависимости от режимов нагрева и охлаждения.

На сегодняшний день в рамках ГНТП «Технологии и оборудование машиностроения» совместно с ОАО «МАЗ» и ГНУ «ОИМ НАН Беларуси» ведутся работы по созданию энергосберегающей технологии и комплекса автоматизированного индукционного оборудования для нагрева под пластическую деформацию на горизонтально-ковочной машине для производства деталей номенклатуры ОАО «МАЗ». Эта разработка позволит повысить экономию топливно-энергетических ресурсов в 3,8 раза и улучшить качество выпускаемых деталей за счет исключения угара и обезуглероживания металла. Начиная с 2013 года по этой технологии будет выпускаться около 400000 деталей в год на сумму 130 млн долларов, в том числе на экспорт – около 100 млн долларов. Кроме того, будет создана технология и комплексная установка для поверхностной термообработки деталей автомобильной техники. Ее внедрение на ОАО «МАЗ» позволит получить экономию около 100 тыс. долларов в год за счет сокращения потребления электроэнергии и наладить выпуск около 140000 деталей в год на сумму около 40 млн долларов, в том числе на экспорт – около 30 млн долларов.

Такие комплексы индукционного оборудования будут включать в себя современный преобразователь частоты на полупроводниковой основе, нагревательную установку с полной автоматизацией, программируемый блок системы управления и контроля. Кроме того, на базе ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» в 2011 году планируется создание сертифицированного производства универсальных индукционных установок и дополнительного оборудования, а также разработка современных технологических процессов обработки различных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А.И. Гордиенко [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2009. – 287 с.
2. Актуальные проблемы прочности / А.И. Гордиенко [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2010. – 435 с.

ФИЗИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ НА ПОВЕРХНОСТЬ

В. Т. Барченко, В. Д. Гончаров, Д. М. Репеева,

¹Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»;

А. А. Лисенков

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

Рассмотрена модель воздействия теплового потока на поверхность при наличии катодных пятен. Исследовано распространение теплоты в глубь металла, влияние скорости нагрева на структурные превращения. Показаны преимущества исследованного метода нагрева при закалке деталей.

Вакуумно-дуговой разряд – это сильноточный, самостоятельный разряд, развивающийся в замкнутом объеме в парах материала катода. Эмиссионным центром разряда является катодное пятно, характеризующееся малыми размерами и являющееся источником первичных электронов и основанием столба дуги. Высокая температура в пятне обуславливает интенсивное воздействие на материал катода. Существование и перемещение катодного пятна трактуются как нестационарные, циклические процессы возникновения и отмирания эмиссионных центров (*emission center or explosive center*).

Процессы в дуговом разряде подразделяются:

- на генерационные, протекающие в катодном пятне (в расплавленном слое жидкого металла) и оказывающие влияние на поверхность катода;
- протекающие в прикатодной области, определяющие условия генерации и динамику перемещения катодных пятен;
- протекающие в зоне транспортировки, в межэлектродном пространстве, начиная от области с сильно неидеальной низкотемпературной плазмой.

В процессе работы источника плазмы на поверхности катода наблюдаются катодные пятна различных типов, отличающиеся главным образом подвижностью, взаимной связью и временем возникновения [1].

Локализация энергии с высокой плотностью в малых объемах и выделение ее за время от наносекунд до единиц микросекунд приводит к сложным физико-химическим процессам, протекающим на поверхности твердого тела и приводящим к изменению структурного и фазового состава поверхностного слоя.

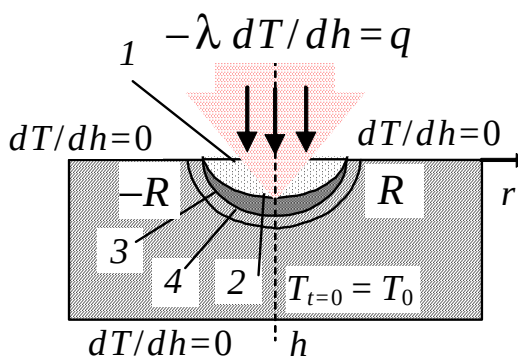
Технологические устройства на основе дугового разряда широко используются на предприятиях черной и цветной металлургии для удаления ржавчины, окалины и других загрязнений с металлических поверхностей [2].

Принцип теплового воздействия катодных пятен вакуумно-дугового разряда на поверхность металла может применяться как для получения порошков [3], так и для поверхностной закалки деталей [4].

Катодное пятно, как тепловой источник воздействия на поверхность катода, моделируется в форме круга радиусом R (рис. 1).

Полагая, что плотность электрического тока, протекающего через поверхность катодного пятна, одинакова во всех точках области и пренебрегая краевыми эффектами, в первом приближении интенсивность распределения мощности теплового источника можно считать равномерной по пятну.

Рис. 1. Модель воздействия теплового потока на поверхность: 1 – начальное положение катодного пятна на поверхности; 2 – нижняя граница при кипении; 3 – нижняя граница жидкой фазы; 4 – граница прогрева катода до температуры эмиссии



Таким образом, в пределах катодного пятна тепловой поток, подводимый из разряда и взаимодействующий с поверхностью, постоянен для любого момента времени: $-\lambda(dT/dh)_{h=0} = q$, $(0 \leq r \leq R)$, а вне его равен нулю. Катод, по отношению к эффективному размеру источника тепла, является полубесконечным телом, поэтому на бесконечном удалении от поверхности тепловой поток равен нулю, а температура постоянна: $(dT/dh)_{h=0} = 0$, $(-\infty \leq r \leq -R \text{ и } R \leq r \leq \infty)$ $(-R \leq r \leq R)$; $(dT/dh)_{h=\infty} = 0$; $T_{h=\infty} = T_0$. В исходном состоянии температура поверхности катода одинакова во всех точках: $T_{t=0} = T_0$.

За короткое время воздействия катодного пятна на поверхность выделенная теплота распространяется в глубь металла, тонкий слой которого нагревается выше температуры аустенитных превращений. Теплота сохраняется в течение времени, достаточного для растворения углерода. В процессе нагрева на поверхности формируются наибольшие градиенты температур. Для быстрого охлаждения тепло отводится в тело металла.

Скорость нагрева оказывает существенное влияние на размер рекристаллизованного зерна, так как с ее увеличением число центров

рекристаллизации растет быстрее, чем скорость роста центров. Это приводит к измельчению зерна. Кратковременное пребывание стали в области закалочных температур и протекание фазовых превращений при температурах, превышающих равновесные, приводят к получению механических свойств, отличающихся от свойств стали, закаленной традиционными источниками воздействия.

Более мелкая структура закаленной стали достигается за счет быстрого нагрева поверхности катодным пятном (скорость перемещения катодных пятен по рабочей поверхности достигает 100 м/с), что обеспечивает получение более благоприятного сочетания достигаемых свойств прочности и вязкости.

В процессе поверхностной закалки изделий существенное влияние оказывает состав окружающей газовой среды. При высокой температуре происходит химическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой, при этом особое значение имеют два протекающих процесса – обезуглероживание стали, связанное с выгоранием углерода в поверхностных слоях ($C + O_2 \rightarrow CO_2$), и окисление поверхности, ведущее к образованию окалины и окислов ($Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$). Это приводит к необходимости задавать припуск на последующее шлифование, что также удорожает и усложняет технологию изготовления обрабатываемых деталей.

В [4] предложен способ закалки стальных изделий за счет нагрева поверхностного слоя изделия локально-концентрированным источником энергии в виде катодного пятна в вакууме с последующим его охлаждением за счет отвода тепла в тело изделия. В этом случае эффект достигается за счет высокой скорости перемещения эмиссионного центра (до 100 м/с), малых его геометрических размеров (10^{-6} м), высокого уровня выделяющейся мощности (до 10^9 Вт/м²) и активного охлаждения.

Использование данного способа может повысить качество получаемых изделий за счет устранения процессов обезуглероживания и окисления, а также позволит расширить номенклатуру обрабатываемых изделий за счет обработки сложных геометрических поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные технологические процессы в производстве мощных генераторных ламп / В.Т. Барченко и др. – СПб: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – 213 с.
2. Кузнецов, В.Г. Вакуумная электродуговая очистка поверхности металлопроката – новое направление в металлообработке: материалы 7-й Междунар. конф. «Пленки и покрытия-2005». – СПб., 2005. – С. 57 – 62.
3. Способ получения мелкодисперсных порошков: пат. № 2395369 МПК В22F9/12. / В.Т. Барченко и др.; опубл. 27.07.2010. – Бюл. № 21.
4. Способ закалки стальных изделий: пат. РФ № 2386705 МПК С21D1/06. / В.Г.Кузнецов, А.А. Лисенков; опубл. 20.04.2010. – Бюл. № 11.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ОБРАБОТКА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Проанализированы способы механической обработки сферических поверхностей деталей, рассмотрены преимущества высокоскоростного охватывающего фрезерования, приведены основные зависимости и формулы кинематических и геометрических параметров и характеристик процесса резания.

В машиностроении широко используются детали со сферическими поверхностями, к которым предъявляются повышенные требования по точности и качеству. Проведенный анализ показывает [1], что при обработке сферических поверхностей деталей в машиностроении в основном используются способы обработки либо на специальных станках, либо при помощи специального инструмента, причем обработка при помощи копировальных устройств имеет недостаточную точность.

Для получения сферической поверхности с определенными геометрическими характеристиками необходим инструмент с такими же жестко заданными характеристиками, что сложно и трудоемко в изготовлении. Поэтому при обработке точных сферических поверхностей целесообразнее использовать способы обработки, в которых точность формообразования сферической поверхности определяется не профилем инструмента и точностью поворотного или копировального приспособления, а точностью траектории движения заготовки и инструмента, то есть кинематикой процесса, что позволит получить сферические поверхности высокого качества и точности.

К таким способам обработки относится способ охватывающего фрезерования сферических поверхностей. К недостаткам этого способа можно отнести не очень высокую производительность. Учитывая, что все чаще в современном машиностроительном производстве применяется высокоскоростная обработка, большой научный интерес представляет процесс обработки сферических поверхностей деталей способом охватывающего фрезерования с высокими скоростями резания.

К достоинствам высокоскоростной обработки относятся высокая производительность, высокое качество и точность обработанной поверхности, малые силы резания, практически полный отвод теплоты в стружку [2], что позволяет в значительной степени повысить качество и точность обработки сферических поверхностей без применения окончательной абразивной обработки.

Однако использование преимуществ высокоскоростной обработки применительно к сферическим поверхностям деталей требует изучения ки-

нематических и геометрических параметров и физических характеристик процесса резания.

Направление скорости резания определяется углом

$$\sigma_N = \arcsin \left(\frac{|V_2| \cos \beta}{\sqrt{(|\bar{V}_1| + |\bar{V}_2| \cos \beta)^2 + (|\bar{V}_2| \sin \beta)^2}} \right), \quad (1)$$

где $\bar{V}_1$ – вектор скорости вращения инструмента; $\bar{V}_2$ – вектор скорости обрабатываемой заготовки; β – угол установки оси вращения обрабатываемой заготовки относительно оси инструмента.

Используя известные соотношения изменения главных переднего и заднего углов в кинематической и статической системах координат

$$\gamma_k = \gamma_{cm} + \sigma_N; \quad (2)$$

$$\alpha_k = \alpha_{cm} - \sigma_N, \quad (3)$$

получили, что при увеличении скорости резания от нуля до 2000 м/мин изменение углов в процессе обработки не превышает 0,25 градуса. Отсюда можно сделать вывод, что при высоких скоростях резания изменение углов незначительное. Но и эти незначительные отклонения значений углов могут оказать существенное влияние на процесс обработки сферической поверхности с высокими скоростями резания. При этом следует отметить, что большое влияние на углы лезвия оказывает угол установки инструмента относительно обрабатываемой заготовки. В вышерассмотренном примере угол установки оси инструмента относительно оси обрабатываемой заготовки определяли условием обработки заданной сферической поверхности.

Мгновенное сечение срезаемого каждым зубом фрезы слоя определяется по формуле

$$f = \frac{Q}{l} = \frac{\pi d_3 t S_o}{\frac{\pi D n_\phi}{n_3}} = \frac{d_3 n_3}{D_\phi n_\phi} t S_o, \quad (4)$$

где d_3 – диаметр заготовки; D_ϕ – диаметр фрезы; n_3 – частота вращения заготовки; n_ϕ – частота вращения фрезы, t – глубина резания, S_o – подача на оборот.

При высокоскоростном фрезеровании сферических поверхностей большое значение имеет величина температуры в обрабатываемой заготовке, т. к. температурные деформации оказывают существенное влияние на точность и качество детали. Расчетные и экспериментальные данные зависимости температуры от угла контакта зуба фрезы с заготовкой представлены на рис. 1.

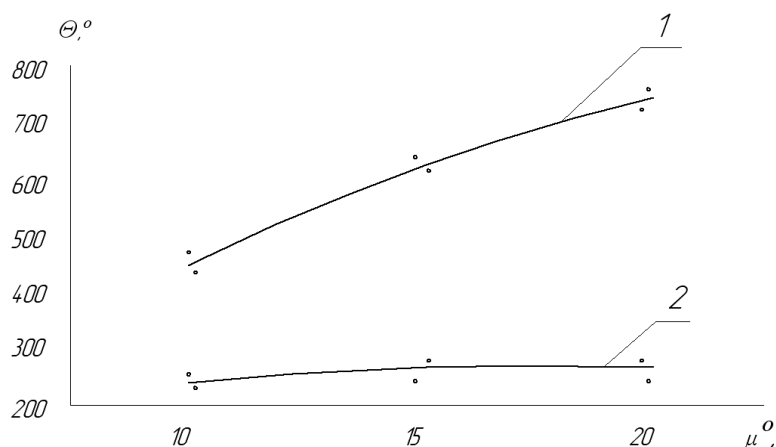


Рис. 1. Зависимость температуры от угла контакта:
1 – расчетная; 2 – экспериментальная

Из графиков (см. рис. 1) видно, что с увеличением угла контакта температура в заготовке повышается, причем расчетные значения температуры выше, чем экспериментальные. Это объясняется тем, что измеряемая температура является «среднеинтегральной», и она значительно меньше «мгновенной» температуры, создаваемой при срезании слоя зубом фрезы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ способов обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. «Прикладные науки». – Новополоцк: ПГУ. – 2006. – № 12. – С. 42 – 45.
2. Ящерицин, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицин, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое издание, 2005. – 512 с.: ил.

УДК 621.91.04

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ЛУЧОМ

В.А. Данилов, Р.А. Киселев

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Показаны особенности формообразования поверхностей высококонцентрированным потоком энергии в виде луча. Применительно к станкам для раскроя материала рассмотрены кинематика формообразования линейчатых поверхностей, в том числе элементов сопряжения обрабатываемых фасок, пути ее реализации для расширения технологических возможностей оборудования.

В схемах обработки высококонцентрированным потоком энергии (плазменная, лазерная, гидроабразивная резка и т.п.) производящий элемент представляет собой луч. Согласно первой модели формообразования поверхность формируется как множество положений ее образующей, в рассматриваемом случае прямой. Последней для получения заданной поверхности сообщается прямолинейное, вращательное или винтовое движение.

Кинематика формообразования поверхности энергетическим лучом аналогична обработке прямолинейной режущей кромкой, поскольку для создания образующей поверхности в обоих случаях не требуется исполнительное движение, а движение формообразования должно быть таким, чтобы производящий элемент соприкасался с номинальной поверхностью изделия. При высокой энергоемкости рассматриваемого процесса линейное касание производящего элемента с номинальной поверхностью изделия обеспечивает минимальные затраты энергии.

Особенности методов обработки энергетическим лучом накладывают определенные ограничения на схемы формообразования, в частности, при раскрое материала не применяется построчная обработка поверхности, как, например, при формировании сложных поверхностей фрезерованием, так как энергетический луч производит полное отделение детали от заготовки. Известно, что формообразование номинальной поверхности производящей поверхностью возможно, если в точках касания этих поверхностей скорость их относительного перемещения направлена по касательной к обеим поверхностям, то есть лежит в общей для них касательной плоскости. В рассматриваемом случае производящая поверхность трансформирована в прямую, поэтому положение касательной плоскости определяется номинальной поверхностью детали.

Перемещение прямой в пространстве в зависимости от формы направляющей линии, ее положения и вида движения (прямолинейное, вращательное, винтовое) позволяет формировать различные линейчатые поверхности, сочетание которых определяет геометрию обработанной поверхности. Следует отметить, что формообразующие возможности рассматриваемых инструментов используются недостаточно, что ограничивает технологические возможности оборудования. Обычно инструменты энергетического типа (лазерные, плазменные, гидроструйные и т.п.) используются для раскроя листового материала с использованием простых линейчатых поверхностей в виде плоскости, замкнутой или незамкнутой цилиндрической поверхности. При соответствующих движениях и ориентации энергетического луча образуются поверхности в виде конуса, однополосного гиперболоида, геликоида.

Механика технологического оборудования базируется на кинематике реализуемых схем обработки. В этой связи рассмотрим формообразование линейчатой поверхности в виде фаски на плоской заготовке. По геометрии

можно выделить четыре группы фасок, в пределах каждой из которых формообразование осуществляется определенной совокупностью движений. При формообразовании плоской фаски необходимы формообразующее движение $\Phi(\Pi_1)$ и движение ориентации $Op(B_2)$, первое из которых обеспечивает перемещение образующей по прямолинейной направляющей, а второе служит для установки угла фаски. Фаска в виде цилиндрической поверхности формируется движениями $\Phi(\Pi_1, \Pi_2)$ и $Op(B_3)$. Сочетание движений Π_1 и Π_2 обеспечивает перемещение образующей по направляющей в виде плоской кривой, что определяет необходимость кинематической связи между ними. Движение $\Phi(\Pi_1, \Pi_2)$ может быть заменено движением $\Phi(B_1, B_2)$.

Фаска, ограниченная поверхностью коноида, формируется движением $\Phi(\Pi_1, B_3)$, при этом движение Π_1 служит для перемещения образующей по направляющей, а кинематически связанное с ним движение B_3 обеспечивает заданный угол α между образующей формируемой поверхности и поверхностью заготовки.

Для обработки фаски в виде поверхности общего порядка необходимо формообразующее движение $\Phi(\Pi_1, \Pi_2, B_3, B_4)$. Его элементарные движения Π_1 и Π_2 обеспечивают перемещение образующей по направляющей, вращательное движение B_3 – необходимый угол между образующей формируемой поверхности и поверхностью заготовки, а вращательное движение B_4 задает плоскость движения B_3 .

Кинематика формообразования определяется формой заготовки (плоская, круглая и т.п.), поверхностями, формирующими деталь, и геометрией сопряжения этих поверхностей. Например, две плоские фаски могут быть сопряжены по прямой, конической поверхности и плоскости (рис. 1).

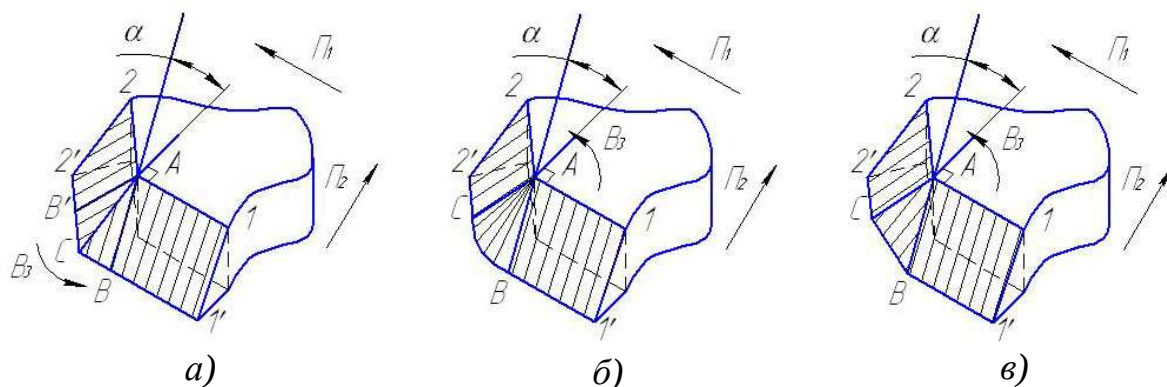


Рис. 1. Геометрия и кинематика формообразования элементов сопряжения фаски:
а – по прямой; б – по конической поверхности; в – по плоскости

Каждое из этих сопряжений может быть получено различными сочетаниями исполнительных движений и последовательностью их выполнения, что необходимо учитывать при проектировании обрабатывающей системы станка.

Движение формообразования $\Phi(P_1, P_2)$ присуще станкам для раскроя металла с декартовой системой позиционирования. Для обеспечения обработки рассмотренных геометрических элементов сопряжения в данную систему необходимо ввести дополнительный модуль, позволяющий изменять создаваемыми им движениями положение образующей (направление энергетического луча), в том числе с сохранением неподвижной точки ее поворота.

Дополнительный модуль может быть построен на базе механизмов традиционного, нетрадиционного (параллельной кинематики) или смешанного типов. Так как для формирования рассмотренных сопряжений линейчатых поверхностей требуется не более трех дополнительных движений, то для построения механики дополнительного модуля из нетрадиционных механизмов целесообразно использовать трипод с тремя степенями свободы, позволяющий сообщать установленному на его платформе исполнительному органу два вращательных и одно поступательное движения. Конструкция трипода обеспечивает необходимую точность позиционирования инструмента и возможность поворота его в любой плоскости из любого положения.

Оснащение таким дополнительным модулем станка портального типа для раскроя материала позволяет значительно расширить его технологические возможности. Автономность дополнительного модуля создает возможность модернизации существующих станков этого типа.

УДК 621.5.048

УМЕНЬШЕНИЕ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СПИРАЛЬНЫХ ТРУБ

Н. Н. Попок

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Н. В. Мамонов, Д. Н. Мамонов

ОДО НПП Термопасс, Полоцк

Рассматривается возможность применения труб большого диаметра (100 – 700 мм) из тонкостенной стали со спиральной накаткой в технологическом оборудовании.

Сопротивление внешним воздействиям и устойчивость к температурным деформациям являются основными моментами в применимости и целесообразности изготовления изделий, использующих тонкостенные трубы. Рассмотрим прямошовную трубу из нержавеющей стали диаметром

170 мм и толщиной 1 мм при температуре порядка 400 К. Для нее предельно допустимое давление близко к 0,1 МПа. Необходимо добиться показателя в 2 МПа, не слишком проиграв в сложности производства и стоимости материалов. Давление крепежных ребер и колец, как известно, увеличивает сопротивляемость внешним воздействиям. Кроме наваривания колец жесткости, можно прибегнуть и к другим методам. Можно, например, упрочнить поверхностные слои материала с помощью дополнительной обработки химикатами или фазонами. Кроме того, возможно использование структурированных материалов при изготовлении труб или применение поверхностных деформаций после их изготовления.

Наиболее перспективным является поверхностное пластическое деформирование, в частности, метод накатки спирали, как наиболее рентабельный. Принципиально возможным методом получения спирали на поверхности тонкостенных труб является метод ударно-пластической деформации или статико-импульсной обработки, который позволяет получать накатку с глубиной профиля 1 – 2 мм [1], возможен прокат трубы между двумя роликами с применением устройства для накатки желобов на трубах [2] или устройства для упрочнения тонкостенной трубы накаткой спирали [3], или изначальное накатывание профильных канавок и последующее сваривание полосы в трубу с использованием устройства для накатывания профильных канавок [4]. Для данной работы наиболее приемлемым вариантом является устройство для упрочнения тонкостенной трубы накаткой спирали по [3]. Устройство содержит раму, на которой размещены опоры и два ролика для накатки, один из которых установлен с возможностью перемещения в направлении другого (рис. 1). К достоинствам этой установки можно отнести простоту регулируемости частоты и глубины рельефа накатки и возможность накатывания спирали на всю длину трубы.

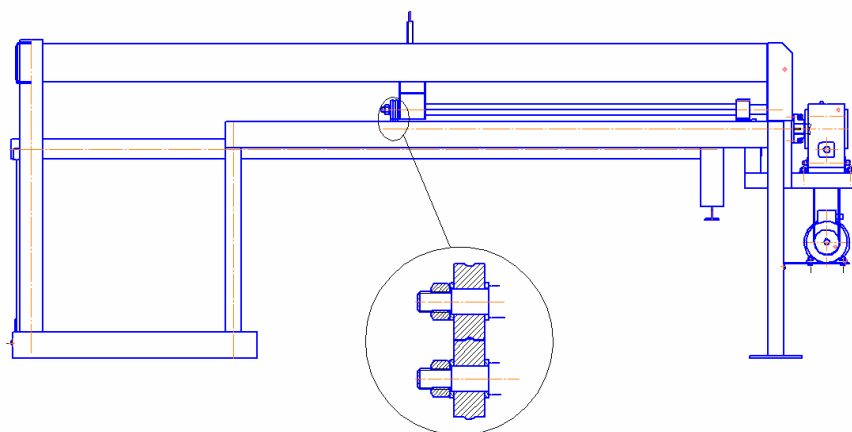


Рис. 1. Установка для накатки профильных канавок

Важным моментом в применении метода в производстве является последующая обработка изделий, в частности, создание технологических от-

верстий, сравнимых с диаметром трубы. Сложность формы поверхности создает проблему простого вырезания отверстий. Конечно, можно применить установку лазерной или плазменной резки. Однако это не исключает необходимости отбортовки отверстия, т.е. придания ему правильной формы. Эту проблему можно решить штамповкой, используя специальные пресс-формы.

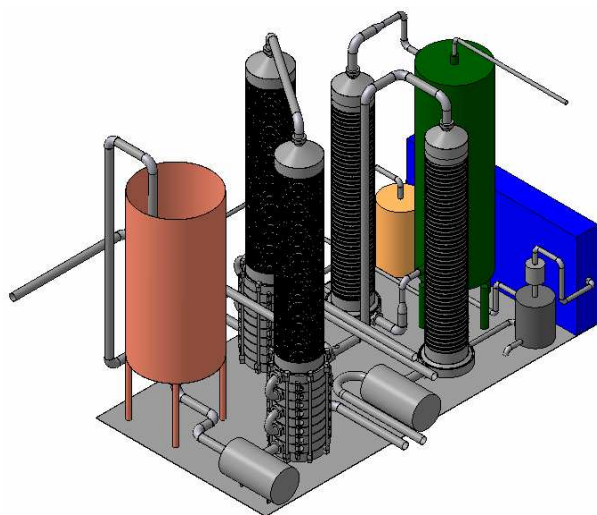


Рис. 2. Трубчатая охлаждающая установка

Таким образом, применение метода накатки спирали для упрочнения тонкостенных стальных труб при производстве технологического оборудования весьма возможно.

Рассмотрим некоторые примеры применения этих методов в технологическом оборудовании. Использование метода дало хорошие результаты в теплообменном оборудовании. В теплообменниках типа «труба в трубе» (теплообменник трубчатый типа ТТ)

использование труб со спиральной накаткой увеличивает давление, которое выдерживает установка (рис. 2). В нем создаются параллельные (по совместимости) потоки веществ различной температуры. Межтрубное пространство позволяет достигать большой поверхности теплопередачи, высоких скоростей протекающих жидкостей при сравнительно малой материалоемкости. Также использование труб со спиральной накаткой оправдало себя и при изготовлении газогенераторных котлов (твердотопливные газогенераторные котлы КВМ). Кроме того, возможно применение этих труб и в другом оборудовании (в динамических аэротрубах двигателей, вакуумных камерах и т.п.).

Результаты испытаний труб различного диаметра по критерию допускаемого давления представлены в табл. 1. При этом высота накатки спирали составила 10 мм, шаг накатки 40 мм и толщина стенки трубы 1 мм.

Таблица 1

Результаты испытания труб со спиральной накаткой

Диаметр, мм	Допустимое давление (МПа)
До 170	2,0 – 2,5
170 – 300	0,9 – 1,1
300 – 450	0,4 – 0,6
450 – 630	0,2 – 0,27

Таким образом, применение метода накатки спирали весьма целесообразно при производстве установок для охлаждения жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс ppdsio.narod.ru.
2. Электронный ресурс www.rems.ru/nakat.
3. Устройство для упрочнения тонкостенной трубы накаткой спирали: а.с. 13839 РБ.
4. Устройство для накатывания профильных канавок: а.с. 980906, 1982.

УДК 537.533; 621.384

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ

Д. А. Антонович, В. Г. Залесский

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Предложена концепция и алгоритм расчета газодинамического канала с двухлинзовой электронно-оптической системой для транспортировки электронного пучка в плазменных источниках электронов при повышенных давлениях в рабочей камере.

В реальных технологических условиях процесс электронно-лучевой сварки сопровождается интенсивным газоотделением, что приводит к всплеску давления в рабочей камере и пробоям ускоряющего промежутка независимо от типа эмиттера электронов – термокатодного или плазменного [1]. Для снижения влияния давления в технологической камере на условия формирования пучка в ускоряющем промежутке используют принцип раздельной откачки технологической камеры и электронной пушки с транспортировкой пучка через газодинамический канал (ГДК). Электронно-лучевые установки с таким способом откачки имеют значительно меньшее подготовительное время для реализации технологического процесса, что повышает их производительность.

Плазменные источники электронов (ПИЭЛ) имеют рабочее давление на порядок выше, чем термокатодные пушки (до 10^{-2} Па), и менее чувствительны к повышенному давлению в области формирования электронного пучка. Поэтому ПИЭЛ целесообразно применять при создании энергокомплексов с раздельной откачкой технологической камеры и области формирования пучка. Однако в ПИЭЛ электронные пучки являются расходящимися, что не позволяет применять системы транспортировки термокатодных пушек к плазменным источникам. Поэтому в ПИЭЛ целесообразно применять ГДК с двухлинзовой электронно-оптической системой. Здесь приведен пример расчета такого ГДК.

В простейшем случае ГДК представляет собой длинный цилиндрический канал (трубу), длина которого определяется скоростью откачки системы

откачки пушки и допустимым потоком газа в пушку из технологической камеры. Диаметр канала определяется расходимостью электронного пучка (его максимальным диаметром) в ГДК. Первая (по движению электронов пучка) электромагнитная линза обеспечивает снижение до минимума среднего диаметра пучка в ГДК и должна устанавливаться как можно ближе к промежутку ускорения. Вторая электромагнитная линза осуществляет фокусировку пучка на свариваемом изделии после его прохождения через ГДК. Исходными данными для расчета ГДК являются: давление в технологической камере P_T ; рабочее давление в ускоряющем промежутке P_y ; зависимость скорости откачки S_H насосного комплекса откачки пушки от давления на его входе P_H ; расход плазмообразующего газа Q_H , напускаемого в газоразрядную структуру электронной пушки; геометрические размеры электронного пучка в области его транспортировки от отверстия в ускоряющей электроде до обрабатываемой детали. Схема, используемая для расчета ГДК, показана на рис. 1.

При проектировании ГДК можно использовать следующий примерный алгоритм расчетов:

1. Приблизительно оцениваем поток газа, откачиваемого насосным комплексом 4. С одной стороны $Q = Q_H + Q_T = Q_H (1 + \beta)$, где $\beta > 1$ (можно считать $\beta = 2 \dots 3$) – коэффициент, определяющий во сколько раз поток газа из технологической камеры Q_T превышает поток напускаемого плазмообразующего газа Q_H и задаваемый экспериментально. С другой стороны $Q = \alpha P_H S_H$, где коэффициент $\alpha < 1$ (можно считать $\alpha \approx 0,8$) учитывает повышение давления газа P_T в процессе сварки: чем больше объем технологической камеры, тем больше следует брать величину α .

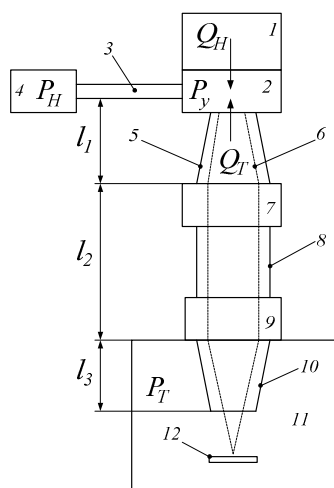


Рис. 1. Схема газодинамического канала с двухлинзовой электрооптической системой:
1 – ПИЭЛ; 2 – ускоряющий промежуток;
3 – трубопровод откачки ускоряющего промежутка;
4 – насосный комплекс откачки пушки;
5, 8, 10 – элементы ГДК; 6 – траектории краевых электронов пучка; 7 – первая магнитная линза; 9 – вторая магнитная линза; 11 – технологическая камера; 12 – свариваемое изделие; Q_T – поток газа из технологической камеры через ГДК в ускоряющий промежуток; Q_H – поток плазмообразующего газа из ПИЭЛ в ускоряющий промежуток

2. Определяем ориентировочное значение требуемой скорости откачки: $S_H = \frac{Q_H (1 + \beta)}{(P_y - \Delta P_3) \alpha}$, где ΔP_3 – перепад давления на трубопроводе (в пер-

вом приближении $\Delta P_3 \approx 0,5P_y$) и определяем тип необходимого паромасляного насоса.

3. В первом приближении радиус r_3 трубопровода откачки 3 можно оценить, задавая его длину l_3 , или, задавая r_3 , определить его длину l_3 . Для этого используем равенство $Q = K_3 \Delta P_3$, где K_3 – проводимость трубопровода откачки 3, в молекулярно-вязкостном режиме течения газа для элементов цилиндрической формы [2] задается соотношением

$$K_3 = \frac{3\pi^2}{64} \frac{r}{\lambda} \frac{r^3}{l} \bar{u} + \frac{2\pi}{3} \frac{r^3}{l} \bar{u} \frac{1 + 3 \frac{r}{\lambda} \sqrt{\frac{\pi}{2}}}{1 + 3,705 \frac{r}{\lambda} \sqrt{\frac{\pi}{2}}}. \quad (1)$$

4. По заданным значениям P_y и P_T определяем в первом приближении проводимость ГДК, используя равенство $Q_T = K_K (P_T - P_y)$, где $K_K = (K_1^{-1} + K_2^{-1} + K_3^{-1})^{-1}$ – проводимость ГДК, необходимая для обеспечения требуемого перепада давления на нем; K_1, K_2, K_3 – проводимость элементов 5, 8, 10 ГДК (рис. 1), рассчитываемая по формуле (1).

5. С учетом расходимости электронного пучка на участке l_1 ГДК, диаметра пучка на участке l_2 и сходимости пучка на участке l_3 определяем в первом приближении конструкцию ГДК и определяем ее проводимость K_{K1} в первом приближении.

6. Сравниваем значения K_K и K_{K1} . Если $K_{K1} > K_K$, следует изменить конструкцию ГДК, удлиняя его участки l_1 и l_2 . Удлинение участка l_3 нецелесообразно, т.к. при этом ухудшаются электронно-оптические свойства фокусирующей системы. В другом варианте возможно уменьшение длины участка l_1 , в результате чего оказывается возможным уменьшение диаметра пучка на участках l_2 и l_3 , и, следовательно, радиуса ГДК на участках l_2 и l_3 . При этом также может быть увеличена длина l_2 . Если $K_{K1} < K_K$, длины участков l_1, l_2 и l_3 ГДК могут быть уменьшены, что снизит потери электронов пучка на стенках ГДК в результате их рассеяния на остаточном газе в ГДК. Если выполняется соотношение $K_{K1} \approx K_K$, первое приближение конструкции ГДК можно использовать при конструировании электронной пушки. Пункты 5 и 6 алгоритма необходимо повторять до достижения условия $K_{K1} \approx K_K$.

Эксперименты по формированию электронных пучков в ГДК с двухлинзовой электронно-оптической системой показали, что при выполнении условия соосности всех элементов электронно-оптической системы токопрохождение составляет не менее 90 %, а параметры пучка соответ-

ствуют требованиям к сварочным пучкам, что позволяет использовать ПИЭЛ для создания электронно-лучевых сварочных установок с высокой производительностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические процессы и системы в микроэлектронике / А.П. Достанко [и др.]; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Беспринт, 2009. – 200 с.
2. Гейнце, В. Введение в вакуумную технику / В. Гейнце. – М.: Гос. энергетич. изд-во, 1960. – 511 с.

УДК 621.9(031)

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛАСТИЧНОГО ИНСТРУМЕНТА С ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ЗЕРНАМИ АБРАЗИВА

А. С. Кириенко

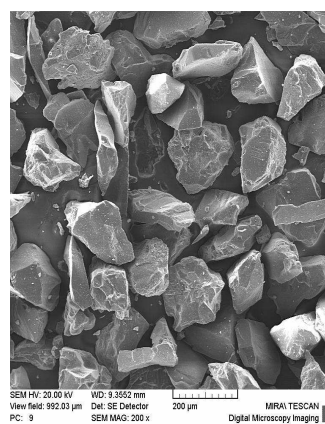
Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Исследования посвящены вопросам разработки технологии и оборудования для получения эластичного инструмента с ориентированными зернами абразива.

Использование такого инструмента при обработке конструкционных материалов приведет к повышению производительности и качества отделочной обработки. Эксплуатационные характеристики такого инструмента значительно выше за счет строгой ориентированности получаемого поверхностного абразивосодержащего слоя (рис. 1) в электростатическом поле [1]. Все это представляет исследования в данной области актуальными.



а)



б)

Рис. 1. Поверхностный ориентированный абразивосодержащий слой эластичного инструмента: а – увеличение $\times 100$; б – увеличение $\times 200$

Работа направлена на разработку технологии и оборудования для получения инструмента, обслуживающего технически и экономически эффективный процесс отделочного шлифования заготовок. В результате увеличения производительности и качества шлифования эластичным инструментом с ориентированными зернами абразива повышается технический уровень машиностроительного производства [1].

В процессе работы проведен большой объем экспериментальных исследований, выполненных с привлечением апробированных методик и средств измерений, прошедших метрологическую аттестацию, современных методов физико-механического анализа и статистической обработки полученных экспериментальных данных. Применяемые методы обеспечили получение достоверных данных о технологии и механизме формирования и управления геометрическими параметрами и эксплуатационными свойствами однослойных покрытий эластичных инструментов из порошков электрокорунда с применением электростатического метода нанесения [2].

Полученные теоретические и экспериментальные данные позволили выявить:

- аналитические зависимости эксплуатационных характеристик ориентированных абразивосодержащих слоев от геометрических, физико-энергетических характеристик абразивных материалов, параметров производственной среды, параметров электростатического поля, глубины и скорости проникания абразивных частиц в связку, угла ориентации абразива и расстояния нанесения;
- абразивный материал, материал связки и основы исходя из критериев электростатической восприимчивости и технико-экономических показателей;
- ориентацию абразивных зерен, позволяющую увеличить предельно допустимые значения напряженного состояния абразивных зерен при шлифовании и прогнозировать необходимые физико-механические и эксплуатационные свойства в зависимости от начальных условий;
- механизм образования абразивосодержащего слоя из зерен электрокорунда в связке на гибкой основе, определяющий взаимосвязь их параметров и макроструктуры поверхностного слоя, ориентированности абразивных зерен, расстояния нанесения абразивосодержащего слоя [3,4].

Результаты исследований позволили разработать:

- механизм управления геометрией и эксплуатационными свойствами абразивосодержащего поверхностного слоя и получения эластичных инструментов на основе порошков электрокорунда с применением электростатического нанесения, позволяющий повысить производительность и режущую способность шлифования в 1,3 – 1,5 раза за счет оптимального

ориентирования абразивных частиц получаемой макроструктуры поверхностного слоя в электростатическом поле;

- оптимальные режимы получения ориентированной макроструктуры абразивосодержащего поверхностного слоя эластичных инструментов в электростатическом поле, повышающие степень ориентированности и приводящие к увеличению износостойкости, производительности и режущей способности в сравнении с традиционными гибкими шлифовальными инструментами на 10 – 40 %;

- технологию и оборудование для получения такого инструмента и его последующего использования в отделочной обработке;

- новый эластичный шлифовальный инструмент с улучшенными эксплуатационными характеристиками ориентированных в электростатическом поле абразивных материалов за счет изменения угла ориентации зерен абразива в структуре поверхностного абразивосодержащего слоя относительно эластичной основы на $20...40^\circ$ [4, 5]. Производительность отделочной обработки таким инструментом повышена в 1,3 – 1,5 раза (рис. 2).



Рис. 2. Варианты отделочной обработки деталей машин эластичным шлифовальным инструментом с улучшенными эксплуатационными характеристиками

Научная значимость работы состоит в выявлении новых зависимостей между ориентированным рабочим поверхностным слоем эластичного шлифовального инструмента и увеличением параметров производительности и качества отделочной обработки таким инструментом, представлений о механизме образования ориентированной макроструктуры поверхностных абразивосодержащих слоев, нанесенных в электростатическом поле. Получили дальнейшее развитие процессы массопереноса и образования

покрытий в электростатическом поле для производства и интенсификации использования абразивных инструментов на гибкой основе. Новизна научных и практических решений защищена четырьмя патентами РБ на полезную модель.

Разработка отмечена Дипломом II степени и серебряной медалью в номинации «Лучший инновационный проект в области передовых технологий и машиностроения» по итогам участия в Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии, инновации» (22.09.2008, г. Санкт-Петербург), а также дипломом (2 место) и ноутбуком за участие в конкурсе-выставке инновационных проектов в номинации «Лучший высокотехнологичный инновационный проект» в рамках Молодежного инновационного форума – 2010 (30.10.2010, г. Минск).

Практическая значимость исследований состоит в использовании их результатов для решения проблем ресурсосбережения и замещения импортной продукции отечественной за счет создания альтернативных традиционным шлифовальным лентам инструментов с поверхностным слоем из ориентированных в электростатическом поле зерен абразива. Социальная значимость работы заключается в возможности организации дополнительных рабочих мест.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завистовский, С.Э. Технология изготовления специального ленточного абразивного инструмента и оценка его производительности / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – №6. – С. 20 – 25.
2. Завистовский, С.Э. Разработка эффективного абразивного инструмента для лентошлифовальной обработки напыленных поверхностей / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, Т.И. Завистовская // Сварка и родственные технологии: респуб. межвед. сб. науч. тр. / ГУ НИКТИ СП с ОП ; редкол.: Г.Н. Здор [и др.]. – Минск – 2004. – Вып. 6. – С. 87 – 89.
3. Завистовский, С.Э. Блок транспортирования частиц абразива в электростатическом поле для специальной установки по производству ленточного абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, П.П. Редько // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – №6. – С. 26 – 29.
4. Завистовский, С.Э. Оценка случайных процессов при конструировании оптимального абразивного инструмента / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Машиностроение: респуб. межвед. сб. науч. тр. / УП Технопринт; редкол.: И.П. Филонов [и др.]. – Минск. – 2003. – Вып. 19. – С. 184 – 186.
5. Завистовский, С.Э. Применение электростатического воздействия для управления процессом формообразования эластичных абразивных поверхностей / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Инженерия поверхности: сб. науч. ст. Междунар. научно-техн. конф., Брест, 25-27 окт. 2007 г.; редкол.: В.М. Хвисевич [и др.]. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2007. – С. 38 – 41.

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ
ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВС**

А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Описана методика и приведены результаты экспериментальных исследований пневмодинамического упрочнения галтелей шеек коленчатых валов. Установлено повышение предела выносливости при изгибе. Разработанные технология и оборудование внедрены в производство.

Одной из важнейших задач, входящих в общую проблему ресурсосбережения, является разработка и внедрение высокоэффективных и экономичных методов восстановления быстроизнашивающихся деталей авто-тракторной техники.

Коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания является одной из самых сложных, нагруженных и дорогостоящих деталей автотракторной техники, которая должна обеспечивать весь срок ее работы до списания. Поэтому, исследования особенностей деформации функциональных поверхностей в результате действия рабочих знакопеременных нагрузок и методов восстановления рабочих характеристик именно для этой детали с целью определения наиболее рациональной и экономичной технологической схемы повышения ресурса коленчатого вала являются актуальными. Результатом таких исследований стала разработка технологии и оборудования восстановления-упрочнения проблемных зон этой ответственной детали, [1]. Учитывая сложную конструкцию коленвалов и ограниченный эффект упрочнения галтелей обкаткой роликом на увеличение предела выносливости из-за удлинения натуральных коленвалов и их коробления наиболее применительным методом упрочнения представляется местное пневмодинамическое упрочнение галтелей дробью или шариками, что может увеличить их усталостную прочность до 40 – 50% и тем самым продлить ресурс работы восстановленных деталей. Для выбора обоснованных режимов ППД (поверхностно-пластического деформирования) и оценки их эффективности отработана методика усталостных испытаний натуральных моделей коленвалов и сопоставлены пределы выносливости моделей восстановленных и упрочненных. Исследования выполняли на натуральных образцах. Упрочнение галтелей шатунных и коренных шеек натуральных образцов выполняли в разработанной пневмодинамической камере. В результате предварительных экспериментов по выбору режимов упрочнения по дав-

лению воздуха и времени обработки были выбраны следующие режимы: давление воздуха 0,46 – 0,48 МПа; продолжительность обработки 5 мин. На данных режимах было изготовлено две серии натурных моделей восстановленных коленвалов из стали 45Х без упрочнения галтелей и с упрочненными галтелями пневмодинамическим наклепом шариками (рис. 1, а). Статическая тарировка осуществлялась с помощью динамометра типа ДОСМ- 1000. Испытание образца считалось законченным с момента зарождения усталостной трещины или после отработки им без разрушения принятой базы испытаний (рис. 1, б).

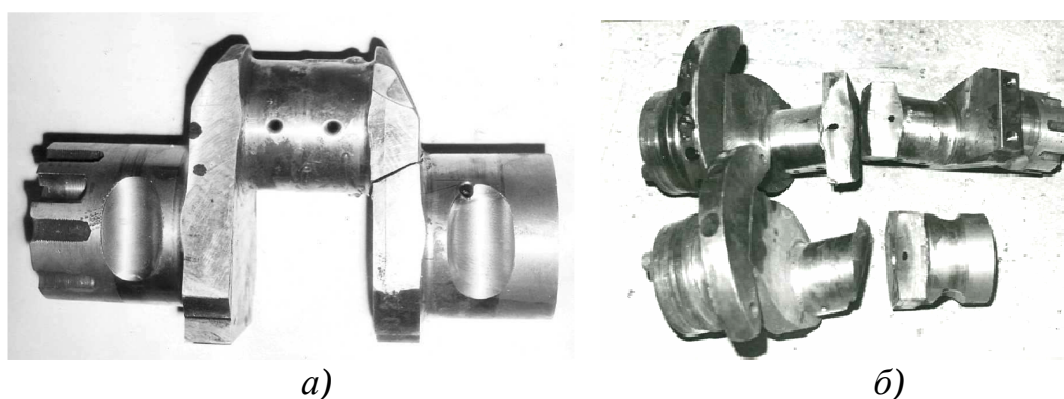


Рис. 1. Модели натурального образца коленчатого вала для исследований на усталостную прочность: а – до испытания, б – после испытания

Приведенные на рисунке 2 результаты испытаний показывают, что упрочнение галтелей восстановленных коленвалов увеличивает их предел выносливости при изгибе от 40...60 МПа до 90 МПа, т. е. в 1,5 раза и более, а по количеству циклов нагружения при одинаковой нагрузке 5кН более чем в 5 раз [1].

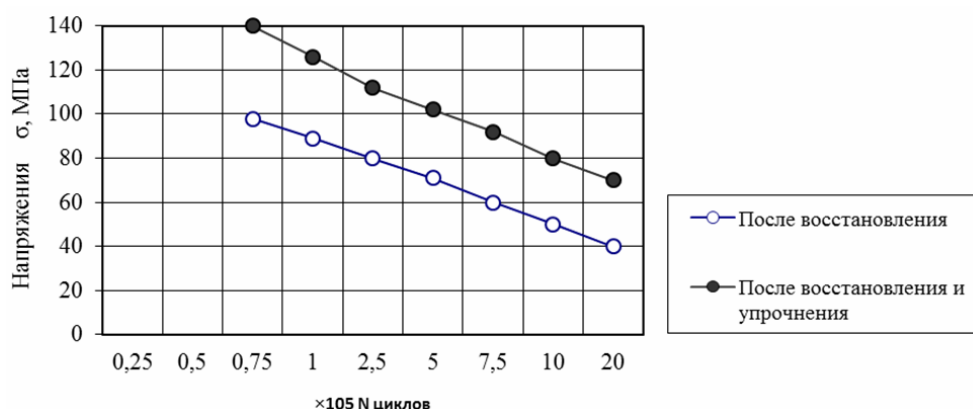


Рис. 2. Кривые усталости натуральных образцов

Результаты испытаний позволили разработать оснастку для упрочнения коленчатых валов и скорректировать конструкторско-технологическую документацию. В производственных условиях ОАО «Витебский

мотороремонтный завод» введен в эксплуатацию участок упрочнения, укомплектованный разработанной технологической оснасткой и внедрена технология пневмодинамического упрочнения шеек коленчатых валов ДВС Д-240 и Д-260.

За время исследований разработка была представлена на 3-х международных научно-технических конференциях, участвовала в 7-и выставках и конкурсах. Две научные работы по данной тематике, подготовленные студентами УО «ПГУ», по итогам Республиканского конкурса студенческих НИР удостоены I-й категории. На Петербургской технической ярмарке в конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка» вручен диплом I-й степени и золотая медаль в номинации «Лучший инновационный проект в области передовых технологий машиностроение и металлургия». За данную разработку на ярмарке инновационных идей 26 мая 2010 г. в Минске авторы разработки и УО «Полоцкий государственный университет» награждены дипломом.

Дальнейшие перспективы развития данной разработки видятся в совершенствовании конструкторско-технологической документации и созданного оборудования и расширении номенклатуры упрочняемых валов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завистовский, С. Э. Исследование усталостной прочности коленчатых валов, упрочненных методом ППД / С. Э. Завистовский и [др.] // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VII Междунар. науч.-тех. конф., Новополоцк, 29 – 30 апреля 2009 г. В 2 ч. / Полоцк. Гос. Ун-т; под. ред. П. А. Витязя. – Новополоцк, 2009.

УДК 621.021

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗУБЬЕВ КОЛЕС МЕТОДОМ ОБКАТА

И. К. Карась

*Солигорский институт проблем ресурсосбережения
с опытным производством, Солигорск*

Рассмотрен процесс теплообразования при шлифовании зубьев методом обката. Установлен закон распределения температуры на поверхности обрабатываемых зубьев, определены максимальная контактная температура в зоне резания и глубина распространения структурных превращений.

Одним из основных недостатков процесса зубошлифования является высокая вероятность образования прижогов и других температурных дефектов, снижающих эксплуатационные свойства обработанной детали [1, 2].

Существует множество технологических приемов, исключающих образование температурных дефектов. Однако на практике ограничиваются в основном снижением режимов резания, что ведет к уменьшению производительности обработки.

Существенным недостатком процесса зубошлифования является возникновение значительных остаточных напряжений в поверхностных слоях глубиной до нескольких десятых миллиметра. Как показывает опыт эксплуатации, остаточные напряжения в поверхностном слое могут повлиять на прочность всей детали, особенно при действии переменных напряжений.

Два основных фактора вызывают возникновение остаточных напряжений – пластическая деформация при силовом воздействии и нагревание поверхностных слоев [1].

В процессе шлифования решающее влияние на образование остаточных напряжений оказывает тепловой фактор [2]. В поверхностном слое в процессе шлифования возникают сжимающие температурные напряжения. Указанные напряжения превосходят предел текучести материала и вызывают пластическую деформацию сжатия. После окончания процесса шлифования и установления нормальной температуры эта деформация сохраняется, что приводит к растяжению поверхностного слоя со стороны внутренних слоев, то есть к образованию в нем растягивающих остаточных напряжений.

Следует отметить, что для ряда марок сталей, особенно высоколегированных, при охлаждении образуется поверхностный мартенситный слой (белый слой толщиной 0,01 – 0,3 мм). Мартенситное превращение происходит при увеличении объема, что может компенсировать уменьшение объема при пластической деформации сжатия [3]. Указанное обстоятельство может привести к образованию остаточных напряжений сжатия. Однако в практических случаях влияние температурных деформации сказывается больше и после шлифования в поверхностном слое наблюдаются растягивающие остаточные напряжения. Силовая пластическая деформация, связанная с усилием резания при шлифовании, имеет второстепенное значение [2].

По экспериментальным данным после шлифования в поверхностных слоях возникают растягивающие остаточные напряжения 400 – 800 Н/мм² на глубине 20 – 50 мкм [2].

При зубошлифовании крупномодульных зубчатых колес методом обката дисковым кругом с конической поверхностью можно принять, что распределение удельных сил и интенсивности теплообразования на площадке контакта описывается экспоненциальным законом (рис. 1) и выражается в формуле:

$$q(x) = q_0 \cdot e^{-mx^2},$$

где $0 \leq x \leq B$ – абсцисса рассматриваемой точки, мм; q_0 – интенсивность теплообразования для периферийных участков круга, кал/см²·с;

$m = 0,01 \dots 0,03$ – темп снижения интенсивности теплообразования, зависящий от свойств круга и материала обрабатываемой детали, $1/\text{мм}^2$.

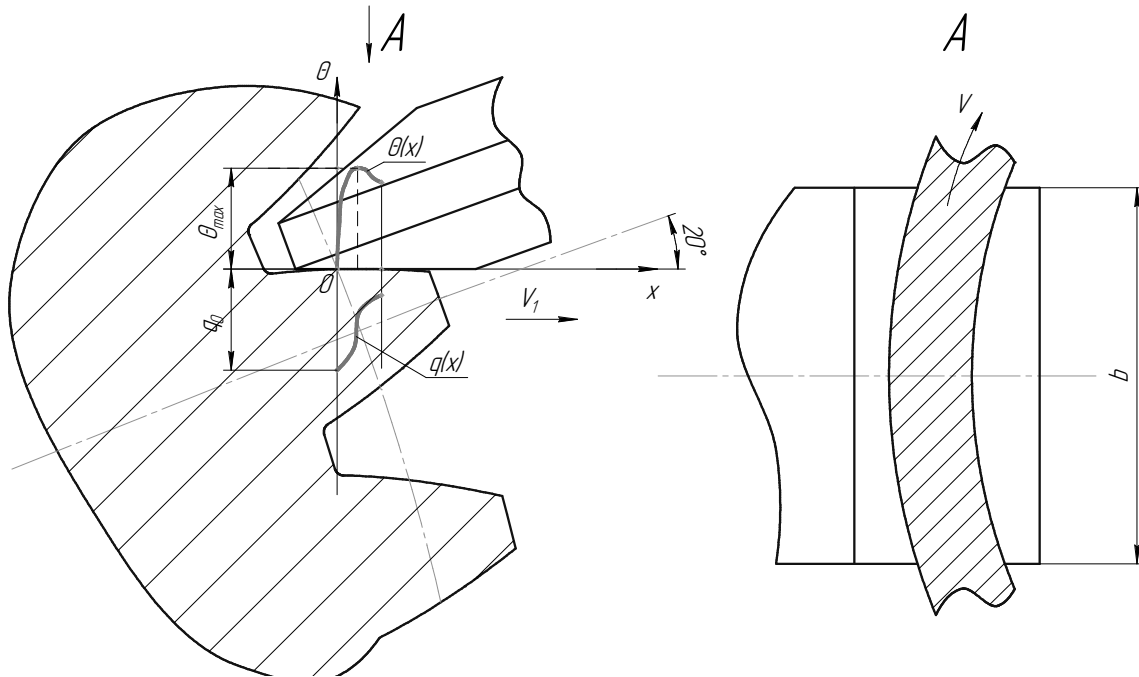


Рис. 1. Схема процесса зубошлифования с иллюстрацией законов распределения интенсивности тепловых потоков $q(x)$ и температур $\theta(x)$

Тогда закон распределения температур на поверхности детали в подвижной системе координат, связанной с кругом, описывается зависимостью

$$\theta(x) = 365(1 - b^*) \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \frac{P_z v}{b \sqrt{v_1 B}} F(\psi, \eta),$$

где b^* – коэффициент, характеризующий относительное распределение теплоты шлифования между кругом и деталью; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, $\text{кал}/\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}$; ω – коэффициент температуропроводности, $\text{см}^2/\text{с}$; P_z – тангенциальная сила при шлифовании, кгс ; v – скорость круга, $\text{м}/\text{с}$; b – ширина площадки контакта, мм ; $F(\psi, \eta)$ – безразмерная функция распределения, зависящая от безразмерных критериев $\psi = x/B$; $\eta = mB^2$; v_1 – скорость детали, $\text{м}/\text{мин}$.

На рисунке 2 представлен график функции $F(\psi, \eta)$ [3]. Как видно из графика функции $F(\psi, \eta)$ температура на площадке контакта круга с деталью распределена неравномерно. Чем интенсивнее темп снижения теплообразования от периферии круга к центру и чем шире площадь контакта инструмента с деталью B , тем ближе область с максимумом температуры к наружной поверхности круга, т.е. $F_{\max}(\psi, \eta) = 1,43 \eta^{0,05}$. Используя это значение можно определить максимальную температуру на поверхности контакта круга с деталью. Так как в процессе шлифовки зубьев используется принуди-

тельная подача масла под давлением в зону шлифования, то полученное значение максимальной температуры на поверхности контакта круга с деталью необходимо умножить на коэффициент $K \approx 0,71$. Закон распределения температур на поверхности детали в подвижной системе координат, связанной с кругом, примет следующий вид:

$$\theta(x) = 520(1 - b^*) \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \frac{m^{0,05} P_2 v}{b \sqrt{v_1} B^{0,4}} \cdot K.$$

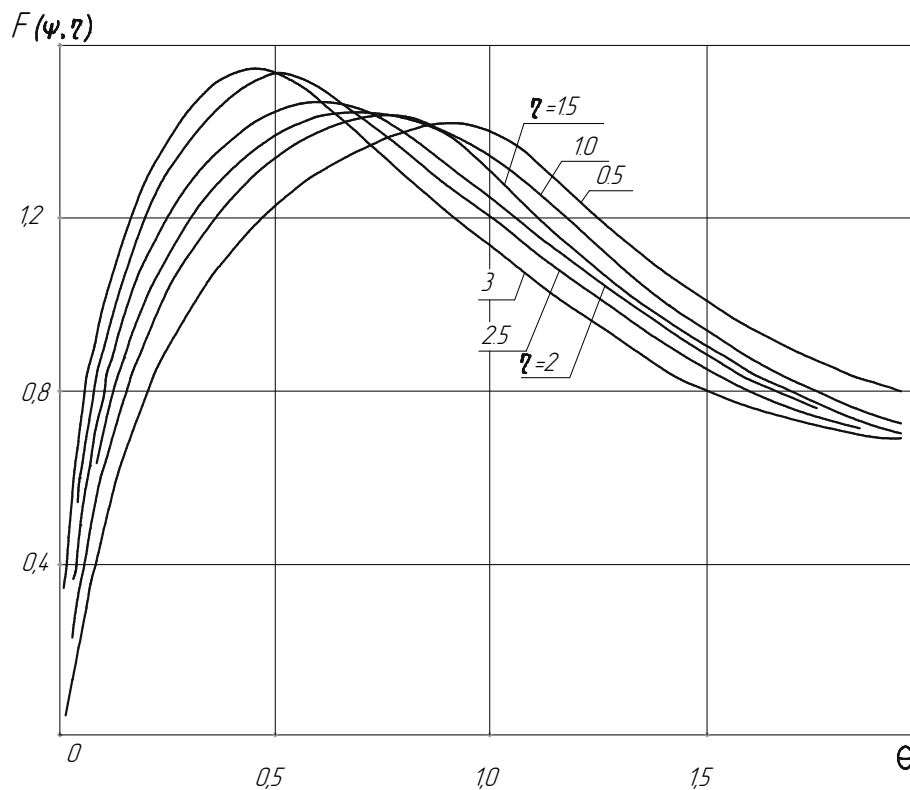


Рис. 2. График функции $F(\psi, \eta)$

Таким образом, зная максимальную контактную температуру и используя выражение Н.А. Подосеновой для определения глубины распространения структурных превращений в поверхностном слое шлифованной детали, основанное на уравнении проникновения тепловой волны, можно определить глубину проникновения критической температуры, вызывающей возникновения прижогов

$$h = (\omega \tau \cdot 10^6)^{0,5} \cdot \ln\left(\frac{\theta_k}{\theta_{omn}}\right),$$

где $\theta_{отп} = 500^\circ$ – минимальная температура отпуска, начиная с которой возникают фазовые превращения; $\tau = 16,7 L_d V_1^{-1}$ – время контакта каждой точки поверхности детали с кругом (L_d – длина дуги).

Использование полученных результатов позволяет повысить производительности при зубошлифовании путем расчета оптимальных режимов резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учеб. пособие / Под общ. ред. М.М Канне, В.Е. Старжинского. – СПб. : Профессия, 2007. – 832 с.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / Под общ. ред. А.Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.
3. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.

УДК 620.178.3

КОНТАКТНАЯ УСТАЛОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, В. М. Кенько, А. И. Камко
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

Результаты исследования контактной усталости стали Р6М5 показали, что деформация поверхностного слоя включает две стадии. На первой стадии протекает наклеп материала, и на второй происходит формирование поверхностных дефектов на глубине упрочненного слоя.

Контактная усталость является достаточно распространенной причиной отказа большого количества деталей машин [1]. Она развивается при воздействии пульсирующей нагрузки на поверхность детали. На начальном этапе эксплуатации повреждения в виде питтингов, как правило, не затрагивают глубинные слои материала и накапливаются в поверхностном слое детали. Изделиями, отказ которых во многом предопределен контактной выносливостью материала, являются подшипники качения, железнодорожные колеса и рельсы, зубчатые колеса, плунжерные пары, штамповая оснастка и др. Для них важной характеристикой является период эксплуатации, в течение которого сохраняются заданные геометрические параметры прецизионных рабочих поверхностей.

Как известно, механизм зарождения питтинга связан с упругим вдавливанием поверхностного слоя в области локализации контактной пульсирующей нагрузки и выпучиванием либо растяжением материала в непосредственной окрестности зоны контакта [2]. При этом, величина локальной деформации в окрестности зоны контакта обусловлена амплитудой

прикладываемой нагрузки и твердостью материала рассматриваемой детали. В некоторых случаях, интенсификация распространения трещин контактной усталости объясняется еще и расклиниванием начальной трещины смазочной жидкостью [3]. Очевидно, что расклинивающий эффект будет возникать на рабочих поверхностях деталей, эксплуатация которых происходит в условиях жидкой смазки, например зубчатых колес или штамповой оснастке. В отсутствии смазки основную роль играет градиент деформаций в окрестности области приложения пульсирующей нагрузки. Величина перепада деформаций в таком случае является определяющим фактором, который влияет на предел контактной выносливости материала и зависит от значения контактной нагрузки.

Наибольшие по величине нагрузки возникают на поверхностях штампового инструмента, особенно на операциях холодной объемной штамповки. Присутствие жидкой смазки при проведении холодной высадки и выдавливания способствует распространению микротрещин, формирующих питтинг.

В большинстве случаев начальный этап развития контактной усталости материала штампов сопровождается незначительными искажениями гравюры инструмента, что не препятствует получению годных изделий. И лишь после достижения определенных искажений формы рабочей поверхности, которые трансформируются в недопустимые изменения соответствующих размеров поковки, эксплуатация инструмента прекращается. Для прогнозирования наработки на отказ штамповой оснастки необходимо знание интенсивности накоплений повреждений в материале рабочей поверхности инструмента. Интересны также структурные изменения материала, протекающие в непосредственной близости от поверхности, разрушение которой протекает с образованием питтингов.

Объектом исследований являлась быстрорежущая сталь Р6М5, которая достаточно часто используется для изготовления сложнопрофильного инструмента для холодной высадки, выдавливания и чеканки [4]. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое инструмента при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [5]. Данная установка обеспечивает контактное нагружение торцевой поверхности плоской части образца за счет его прокатывания по рабочей поверхности дискового контртела. С целью моделирования контактного взаимодействия при трении без проскальзывания, контртело в виде диска крепится на шарикоподшипнике в державке штока, а образец с плоской рабочей поверхностью – в ячейке планшайбы, закрепленной на валу редуктора. Перемещение образца по круговой траектории при встрече с подпружинен-

ным штоком, на котором закреплен диск контртела, вызывает его проворачивание, исключая проскальзывание на контактных поверхностях. Одновременная установка нескольких образцов в планшайбу позволяет проводить сравнительную оценку контактной выносливости в зависимости от изменения режимов термической обработки материала или различных материалов в одинаковых эксплуатационных условиях. Возможность обработки боковых поверхностей плоской рабочей части образца с жестким базированием и применение современного оборудования для подготовки микрошлифов позволили в процессе испытаний осуществить мониторинг накопления усталостных повреждений и изменения структуры по сечению рабочей части образца с применением оптического микроскопа.

В результате проведенных испытаний образцов из быстрорежущей стали Р6М5 получено семейство кривых отражающих поведение материала при воздействии на него фрикционного воздействия и контактной нагрузки. Показано, что механизм накопления структурных повреждений включает две стадии. На первой, протекает наклеп материала, он сопровождается изменением текстурного рисунка стали Р6М5 унаследованного от структуры заготовки. Структура металла претерпевшего наклеп характеризуется равномерным распределением карбидной фазы в матрице, при этом строчечное распределение карбидных частиц в поверхностном слое практически отсутствует. Структурообразование наклепанного слоя не сопровождается изменением микротвердости металла, которая сохраняет свою величину на уровне 10 ГПа. Это позволяет сделать вывод о том, что деформация поверхностного слоя, протекающая за счет перераспределения карбидных частиц в металлической матрице – мартенсите, не сопровождается динамическим старением последнего. Т. е. морфология α -фазы, сформированная предшествующей термической обработкой, имеет оптимальную дефектность кристаллической решетки, что обуславливает ее высокую и стабильную твердость.

Контактное нагружение поверхностного слоя, сопровождающееся увеличением степени наклепа, обеспечивает генерацию дополнительных внутрикристаллических дефектов α -фазы. Этот процесс характеризуется скачкообразным изменением конструктивной прочности материала. Постепенное накопление внутрикристаллических дефектов в поверхностном слое металла активизирует рост микротрещин и их слияние, в результате чего стадия наклепа переходит в стадию зарождения питтингов.

Отделение частиц упрочненного материала обновляет контактную поверхность, в результате чего обнажаются внутренние слои металла, вступающие в контакт с контртелом. При этом повторяются процессы структурных изменений, запускающие новый цикл «упрочнение – питтин-

гообразование». Кривые контактной усталости, указанную цикличность процесса, отражают дискретным приростом увеличения лунки контактного износа образца, протекающего после периода его стабильной работы с незначительным формоизменением. Графическая зависимость, отражающая весь период работы образца, приобретает характерные ступеньки, количество которых соответствует числу циклов наклепа с питтингообразованием.

Динамика контактного изнашивания поверхности образцов стали Р6М5 отличается для различных режимов термической обработки материала. Наиболее высокую способность сопротивления развитию контактной усталости показывают образцы, структура которых отличается высоколегированным мартенситом с карбидными частицами. Технологический режим формирования указанной структуры требует проведения криогенной гомогенизации структуры металлической матрицы сплава с целью полного превращения остаточного аустенита непосредственно после проведения закалки. В случаях когда криогенная модификация осуществляется после одно- или двукратной процедуры дисперсионного твердения сплава, показатели контактной выносливости материала несколько снижаются. Процесс питтингообразования сопровождается образованием более глубоких подповерхностных трещин, что может объясняться наличием повышенных внутрикристаллических искажений, явившихся следствием выделения вторичных карбидных частиц из металлической матрицы. Таким образом, из анализа результатов исследований быстрорежущей стали Р6М5, следует что, наивысшую способность сопротивления контактной усталости демонстрирует сплав, обладающий высокой степенью завершения структурообразования в процессе термической обработки, с мартенситной матрицей не склонной к динамическому старению, в которой распределены избыточные карбидные частицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.
2. Игнатищев, Р. М. Синусошариковые редукторы / Р. М. Игнатищев. – Минск: Вышэйшая школа, 1983. – 107 с.
3. Шапочкин, В. И. Износостойкость деталей машин / В. И. Шапочкин. – Волгоград: Перемена, 1994. – 97 с.
4. Кенько, В. М. Комплексный учет факторов, определяющих стойкость холодновысадочной оснастки / В. М. Кенько, И. Н. Степанкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 2. – С.39 – 42.
5. Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ: пат. 7093 Респ. Беларусь, МПК (2009) G 01N 3/00 / И. Н. Степанкин, В. М. Кенько, И. А. Панкратов; заявитель УО «ГГТУ им. П. О. Сухого»; заявка № u201000717 от 16.08.2010.
6. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 543 с.

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЖУЩЕГО СЛОЯ
АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ**

А. А. Лысов, А. С. Аршиков

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

На основе анализа рисунков микрорельефа шлифования определены оптимальные структурно-топографические и фракционные характеристики алмазносного слоя. Установлено, что наибольшая эффективность резания и стойкость инструмента обеспечивается при упорядоченном расположении алмазных зерен на поверхности инструмента в виде секторов, ограниченных кривыми близкими по форме к логарифмической спирали.

В настоящее время в связи с широким использованием в технике новых конструкционных материалов повышенной твердости и износостойких покрытий важное значение приобретает проблема повышения эффективности и качества их финишной алмазно-абразивной обработки.

Неравномерность распределения сил и скоростей резания в зоне контакта режущего слоя инструмента и обрабатываемой поверхности прецизионных деталей из труднообрабатываемых материалов приводит к неравномерному износу рабочей поверхности инструмента и потери ею своей геометрической формы. Низкая размерная стойкость инструмента приводит к повышенному расходу дорогостоящего алмазного сырья, а также является одной из причин нестабильности финишной обработки и снижению производительности.

Исследование влияния характеристик рабочей поверхности инструмента на качество обработки является одним из активно разрабатываемых в последнее время направлений в области управления формообразованием поверхностей деталей на финишных операциях и преследует цель повышения производительности обработки и размерной стойкости инструмента [1]. Принцип такой оптимизации заключается в повышении износостойкости зон рабочей поверхности инструмента, подвергающихся более интенсивному износу, относительно зон, изнашивающихся менее интенсивно.

Финишная обработка прецизионных поверхностей изделий из труднообрабатываемых материалов является сложным многофакторным процессом. В связи с этим в данной работе изучались условия формирования микрогеометрии обрабатываемой поверхности в зависимости от технологических параметров обработки и структурно-топографических характеристик алмазного инструмента с различной схемой расположения алмазных

зерен в режущем слое, возможности повышения эффективности отделочного алмазного шлифования.

Как уже указывалось выше – неравномерность скоростей взаимодействия в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности, случайное расположение зерен в алмазоносном слое приводит к неравномерному износу алмазного инструмента и потере его геометрической формы, низкой эффективности обработки.

Установлено, что придание режущему слою определенной геометрической формы, т. е. упорядоченное расположение зерен, их геометрическую ориентацию и расстановку по заданной программе, создание требуемой концентрации на различных участках алмазоносного слоя позволяет существенно повысить эффективность резания, размерную стойкость инструмента.

При исследовании влияния указанных факторов на работоспособность инструмента использовались круги, имеющие алмазоносный слой различной геометрической формы: сплошной коаксиальный; спирали Архимеда; логарифмической спирали; радиальных лучей и т. п.

Устанавливалась интенсивность износа алмазоносного слоя в различных точках его рабочей поверхности. Износостойкость инструмента оценивалась по распределению значений коэффициента характеризующего плотность заполнения алмазоносным слоем поверхности инструмента в каждой ее точке. За данный коэффициент принята величина, показывающая общую протяженность алмазоносного слоя на поверхности инструмента по концентрическим окружностям разных радиусов в пределах его диаметра [2].

Для количественной оценки износостойкости кругов с алмазоносным слоем различной конструкции вводился интегральный показатель заполнения, показывающий общую протяженность алмазоносного слоя в радиальном направлении. Определялись также производительность процесса, характеризуемая относительной величиной съема материала.

Конструкции со сплошным алмазоносным слоем и в виде Архимедовой спирали с постоянным по величине, в направлении от центра к периферии, коэффициентом заполнения изнашиваются в процессе работы неравномерно (в центре больше, на периферии меньше), что, в конечном итоге, приводит к снижению размерной стойкости инструмента и качества обработки.

Таким образом, зависимости позволяют определить износостойкость и производительность обработки инструментом с алмазоносным слоем различных конструкций. Зная распределение коэффициента заполнения для каждой из них, можно прогнозировать процесс их износа. При плоском шлифовании заготовок из труднообрабатываемых материалов оптимальной с точки зрения работоспособности является форма режущего алмазо-

содержащего режущего слоя в виде логарифмической спирали. Ограничение приведенной оптимизации заключается в том, что при расчете относительного износа износостойкость рабочей поверхности инструмента предполагается равномерной. При эксплуатации такого инструмента неравномерность износостойкости на рабочей поверхности скажется на распределении давления. Зоны рабочей поверхности, где износостойкость выше, будут изнашиваться медленнее, и давление на них будет увеличиваться. Следовательно, эпюра давления в зоне контакта при обработке будет отличаться от эпюры давления, положенной в основу при его расчете. Однако, в работе [3] установлено, что даже с учетом реальной динамической эпюры коэффициенты износостойкости в общем случае обратно пропорциональны коэффициентам заполнения алмазосодержащим слоем.

Таким образом, структурно-топографическая оптимизация алмазосодержащего режущего слоя позволяет управлять процессом формообразования поверхностей труднообрабатываемых материалов, повышать размерную стойкость алмазных инструментов.

С целью изучения микрогеометрии обрабатываемой поверхности при различных конструкциях режущего слоя была разработана математическая модель, описывающая движение режущих зерен алмазосодержащего слоя, позволяющая отслеживать закономерности формирования следов обработки. В основу имитационной модели был положен принцип формирования поперечного микропрофиля посредством наложения сечения «бороздок», оставленных отдельными зернами круга (рис. 1). Данная имитационная модель реализовывалась при помощи персонального компьютера с выводом на дисплей графической информации в виде воспроизведения рельефа обрабатываемой поверхности при различных структурно-топографических характеристиках алмазного режущего слоя.

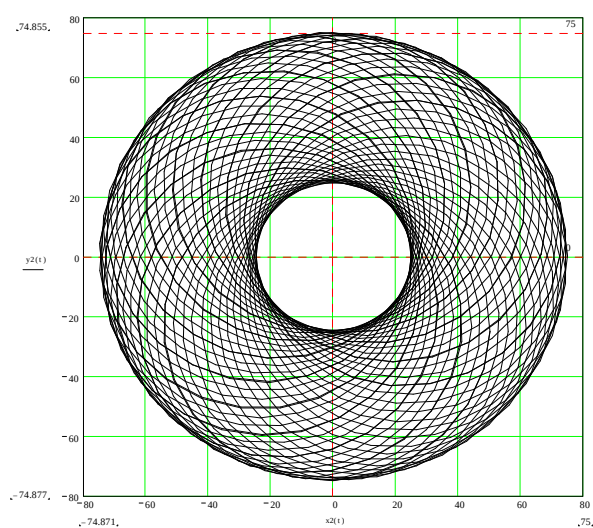


Рис.1. Сетка следов резания при планетарном шлифовании

На кафедре «Технологии и оборудование машиностроительного производства» Полоцкого государственного университета разработаны конструкции и технология изготовления режущих элементов с алмазосодержащим слоем различной геометрической формы. На рис. 2 показан планетарный шлифовальный диск, оснащенный алмазосодержащими режущими элементами в виде логарифмической спирали, предназначенный для финишной обработки твердосплавных уплотнительных поверхностей кольцевой формы нефтехимической запорной арматуры.

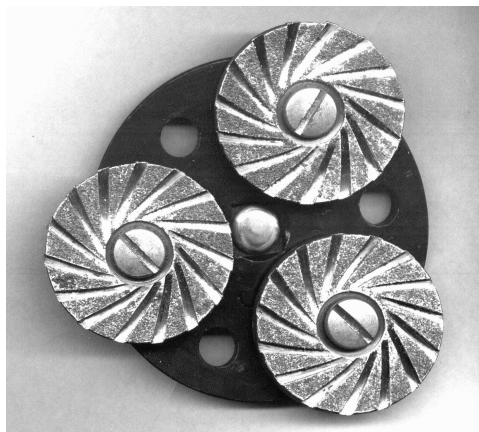


Рис.2. Внешний вид планетарного шлифовального диска

Эксплуатационные испытания данного алмазного инструмента при обработке твердосплавных поверхностей показали повышение производительности на 20 – 30 %, снижение расхода алмазного сырья на 30 – 50 %, уменьшение сил резания и тепловыделения на 30 – 60 %, что обуславливается на наш взгляд, как оптимальным структурно-топографическим расположением алмазных зерен по рабочей поверхности инструмента и повышению числа зерен активно участвующих в работе резания, так и созданием за счет прерывистого контакта с обрабатываемой поверхностью, благоприятных условий стружкообразования и стружкоотвода, снижения интенсивности тепловыделения в зоне резания, благоприятных условий для подачи СОЖ, а также значительного повышения вентиляционной способности круга и интенсивного удаления продуктов обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. – Минск: ДизайнПРО, – 1995. – 208 с.
2. Филатов, Ю. Д. Влияние конструкции инструмента на его работоспособность при плоском шлифовании / Ю. Д. Филатов, В. В. Рогов, Л. Л. Бурман // Синтетические алмазы. – 1979. – Вып.3. - С. 26 – 32.
3. Орлов, П. Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П. Н. Орлов. - М.: Машиностроение, – 1988. – 384 с.

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Е. Бабич, Е. В. Сенчуров, В. В. Падаляк
Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск

Приведены результаты использования способа магнитно-абразивной обработки для финишной обработки концов шпинделей. Магнитно-абразивная обработка обеспечивает требуемые шероховатость и физико-механические характеристики поверхности концов шпинделей.

Детали с коническими поверхностями широко применяются в машинах и механизмах, работающих в различных отраслях народного хозяйства. К ним относятся пальцы шаровых опор и рулевого управления автомобилей, пробки кранов сантехнической арматуры, инструментальные оправки, шпиндели станков, центры для металлорежущего оборудования, дроссельные клапаны гидроаппаратуры и т. п. Обусловлено это тем, что в отличие от цилиндрических конические поверхности при прочих равных условиях обеспечивают высокую точность фиксации и отсутствие зазоров при работе в паре с сопрягаемой деталью, что снижает динамические нагрузки [1]. Однако изготовление деталей с коническими поверхностями связано с необходимостью достижения степени точности не менее 7-го квалитета, что требует в технологическом процессе применения дорогостоящего металлорежущего инструмента, специального оборудования и оснастки. По данной причине возникает необходимость в использовании альтернативных высокоэффективных способов механической обработки, снижающих себестоимость выпускаемой продукции, что является важным с позиции ее конкурентоспособности.

Одним из перспективных способов является магнитно-абразивная обработка (МАО) [2]. В роли рабочей технологической среды при МАО выступают ферроабразивный порошок (ФАП) и смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС). Абразивная щетка из ФАП в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита формируются силами электромагнитного поля (ЭМП), образуемого соленоидными электромагнитной системы (ЭМС).

Технологическая проблема МАО конических поверхностей заключается в обеспечении одинакового значения магнитной индукции B на всех участках конуса детали. Формообразование полюсных наконечников связано с созданием такой их формы, которая эквидистантно копирует конфигурацию детали. Поскольку конусность деталей варьируется в широких пределах, то и растет количество полюсных наконечников как технологи-

ческой оснастки. Поэтому математическое моделирование процесса МАО конических поверхностей приводит к возможности снижения номенклатуры технологической оснастки.

В качестве образцов конических деталей использовались концы шпинделей 30 ГОСТ 836-72 с конусностью 7:24 по ГОСТ 15945-82, 50...54 HRC₉, с технологическими требованиями для станков класса точности В, что составляет $R_a = 0,16$ мкм (рис. 1).

Проверку точности конических базирующих поверхностей концов шпинделей производили контрольным калибром – втулка 30 АТ6 ГОСТ 20305-80, степень точности 6 на длине конуса 50 мм. Припасовка конических поверхностей концов шпинделей и втулки 30 АТ6 ГОСТ 20305-80 производилась путем нанесения типографской краски № 2513 – 26 при условии разведения ее машинным маслом. Толщина краски контролировалась визуально по образцу интенсивности окраски



Рис. 1. Вид концов шпинделей

согласно ГОСТ 2848-75. Прилегание конусных поверхностей калибра и детали по ГОСТ 20305-80 составило 95% при контакте по малому диаметру, а толщина слоя краски – 4 мкм. Шероховатость поверхности концов шпинделей до и после МАО измеряли на профилографе-профилометре 252 – Калибр, допуск круглости – на круглометре «Roundtest RA – 5000» серия 211, прямолинейность – на универсальной индикаторной стойке МНС – 2. Биеение рабочих конусов относительно конусов хвостовиков – индикатором ИЧ – 02 кл.1 ГОСТ 577-68 на штативе Ш – II – Н ГОСТ 10197-70. Для обработки концов шпинделей 30 ГОСТ 836-72 использовался станок СФТ 2.150 00 00 000. Параметры и режимы МАО: магнитная индукция $B = 1$ Тл; скорость резания $V_p = 2,5$ м/с; скорость осцилляции $V_0 = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 1$ мм; коэффициент заполнения зазора $\kappa_z = 1$; величина рабочего зазора $\delta = 1$ мм; время обработки $t = 60$ с. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, зернистость порошка $\Delta=100/160$ мкм; СОТС СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5%-ный водный раствор. Исходная шероховатость поверхности $R_{a1} = 0,8...1,2$ мкм. В качестве альтернативного метода применялась операция шлифования. Станок круглошлифовальный модели 3131, частота вращения шлифовального круга $n_k = 1880$ мин⁻¹; величина подачи шлифовальной бабки $S_{np} = 0,04$ мм; перемещение шлифовальной бабки $S_n = 0,01$ мм; число оборотов детали $n_d = 400$ мин⁻¹. Инструмент – круг абразивный $D \times d \times h = 256 \times 76 \times 20$ мм, электрокорунд ГОСТ 2424-84.

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что разница величин магнитной индукции на малом и большом диаметрах концов шпинделей 30 ГОСТ 836-72 с конусностью 7:24 по

ГОСТ 15945-82 составляет не менее 15%, что позволяет произвести качественную обработку поверхности концов шпинделей.

Результаты обработки концов шпинделей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели производительности МАО и качества обработанных поверхностей

Показатели	Вид обработки	
	Шлифование	МАО
Величина размерного съема, мкм	120...180	20...40
Прямолинейность образующей, мкм	1,6	1,2
Допуск круглости	4	2
Шероховатость после обработки, Ra_2 , мкм	0,4	0,12
Прилегание конусных поверхностей, %	90	8
Биение рабочих конусов, мкм	95	5

Таким образом, исходя из полученных результатов теоретического и экспериментального исследования и математического моделирования процесса МАО установлена возможность его эффективного использования для финишной обработки концов шпинделей ГОСТ 836 – 72.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горохов, В. А. Технология обработки металлов / В. А. Горохов. – Минск : Беларуская навука, 2000. – 438 с.
2. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерецын. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 216 с.

УДК 621.793.3

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН НАНЕСЕНИЕМ КАРБИДНЫХ СЛОЕВ

А. М. Долгих, В. А. Круглик

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Исследованы некоторые характеристики стойкости твердосплавных режущих пластин, подвергнутых химико-термической обработке. В качестве процессов диффузионного насыщения выбраны двухкомпонентные – титанонитрирование, хромотитанирование, хромотитанирование и однокомпонентное хромирование. Насыщение проводили в алюмотермических, предварительно восстановленных смесях, время проведения процессов составляло 4 часа, температура-1000,1100°С. Покртия наносили толщиной

3 – 10 мкм, что обеспечивало им оптимальные свойства. Показано гарантированное повышение стойкости пластин с покрытиями при одновременном повышении микротвердости поверхности (с 1530 до 2190 единиц HV).

Режущий инструмент, изготовленный из твердых сплавов, позволяет производить обработку деталей со скоростью резания, в 2 – 4 раза превышающей скорость обработки материалов аналогичным инструментом из быстрорежущей стали, что способствует увеличению производительности труда. Кроме того, инструментом из твердого сплава можно обрабатывать труднообрабатываемые материалы, плохо поддающиеся или совсем не поддающиеся обработке инструментом из быстрорежущей стали.

В настоящее время широко применяют твердосплавные пластины с различными диффузионными слоями.

В процессе химико-термической обработки спеченных твердых сплавов происходит изменение химического состава и структуры поверхностного слоя, возникновение внутренних напряжений, что оказывает определенное влияние на качественные характеристики поверхности, механические и режущие свойства твердых сплавов.

Диффузионные карбидные слои, получаемые при химико-термической обработке твердых сплавов, отличаются друг от друга по своему строению, фазовому составу и толщине слоя, что влияет на износостойкость режущего инструмента.

Приведены результаты влияния толщины хромированного слоя на стойкость твердого сплава ВК6 ГОСТ 3882 при резании ковкого чугуна марки КЧ 37-12 ГОСТ 1215. За критерий стойкости принимали износ инструмента по задней поверхности.

Показано, что имеется оптимальная толщина слоев, равная 3 – 10 мкм, при которой износостойкость сплава с карбидным слоем максимальна. Резкое уменьшение и даже понижение стойкости сплава со слоями толщиной более 10 мкм можно объяснить ухудшением прочности сцепления слоев с основой и скалыванием их в процессе резания.

Во всех случаях при нанесении карбидных слоев имеется повышение стойкости инструмента как из сплава ВК6, так и из сплава Т15К6, причем на сплаве ВК6 нанесение слоев обеспечивает большее повышение стойкости, чем на сплаве Т15К6. Это связано с более высокой износостойкостью исходного сплава Т15К6, содержащего 15% (по массе) карбида титана.

Значительное повышение износостойкости придают твердосплавному инструменту слои из карбида титана, однако они получены при насыщении из смеси на основе порошка титана. Несколько меньшее повышение стойкости наблюдается у инструмента со слоями из карбида ванадия и карбида тантала. Далее следуют NbC, Cr₂₃C₆, ZrC, MoC и WC.

При совместном насыщении Ti и Nb, Cr и Ti, Cr и Nb были получены карбидные слои с высокими свойствами, в частности, микротвердостью. Влияние состава насыщающей смеси на износостойкость твердых сплавов ВК6 при резании ковкого чугуна КЧ 37-12 и Т15К6 при резании стали 40Х после титанониобирования, хромотитанирования и хромониобирования насыщение проводили при температуре 1000°С в течении 4 часов.

Во всех случаях зависимость стойкости резцов от состава насыщающей смеси имеет вид кривых с максимумом. Максимальное повышение стойкости во всех случаях примерно одинаково. Все это говорит о том, что при насыщении в составах, дающих максимум износостойкости, на твердых сплавах формируются слои, близкие к оптимальным по толщине слоя, фазовому составу, прочности и другим качественным характеристикам.

Из проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- в процессе исследования установлено, что имеется оптимальная толщина диффузионных слоев, равная 3 – 10 мкм, при которой показатели механических свойств твердого сплава с покрытиями максимальны. Резкое уменьшение значений показателей для карбидных слоев толщиной более 10 мкм объясняется ухудшением прочности сцепления полученных слоев с основой, накоплением напряжений структурного, фазового характера, что приводит к скалыванию слоя;

- при нанесении карбидных слоев имеется повышение стойкости инструмента. При нанесении слоев на сплавы с более высокой исходной износостойкостью обеспечивается большее повышение стойкости;

- существует оптимальный состав насыщающей смеси, дающий максимум износостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похмурский, В. И. Влияние диффузионных покрытий на прочностные свойства сталей / В. И. Похмурский // Защитные покрытия на металлах – Киев, – 1970. – №3. – С. 191 – 200.
2. Похмурский, В. И. Некоторые аспекты прочности и пластичности сталей, подвергнутых диффузионному насыщению / В. И. Похмурский // Защитные покрытия на металлах – Киев, – 1972. – №6. – С. 151 – 156.
3. Брохин, А. И. Некоторые физико-механические свойства твердых сплавов с износостойкими покрытиями из карбида титана / А. И. Брохин, В. И. Туманов // Твердые сплавы и тугоплавкие металлы. – М.: Металлургия, – 1976. – №16. – С. 136 – 142.
4. Берштейн, М. Л. Структура и механические свойства металлов / М. Л. Берштейн. – М.: Металлургия, – 1970. – 472 с.
5. Креймер, Г. С. Прочность твердых сплавов / Г. С. Креймер. – М.: Металлургия, – 1971. – 248 с.
6. Кубашевский, О. В. Окисление металлов и сплавов / О. В. Кубашевский, В. С. Гопкинс. – М.: Металлургия, – 1965. – 428 с.

ПРОГРЕССИВНЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

В. А. Данилов, Р. А. Киселев, О. В. Яловский
Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Рассмотрены принципы построения рациональных схем формообразования торцовых зубчатых контуров (ТЗК), обеспечивающих интенсификацию процессов их обработки. Показаны возможности реализации новых способов обработки за счет расширения технологических возможностей универсальных зубофрезерных станков и соответствующего инструментального оснащения.

Обработка торцовых зубчатых контуром (ТЗК) в виде равномерно расположенных по окружности пазов и зубьев у деталей типа кулачковых и храповых муфт, индукторов измерительных устройств и т. п. производится обычно на универсальных фрезерных станках дисковыми или концевыми фрезами с применением делительного устройства. Низкая производительность из-за потери времени на периодическое выполнение движения деления и зависимость точности углового расположения обработанных пазов от точности делительного устройства обуславливают актуальность разработки более эффективных по производительности и точности способов обработки указанных деталей.

Способы обработки ТЗК различаются схемами резания и формообразования, определяющими конструкцию станка. Это обуславливает необходимость комплексного подхода к проблеме интенсификации процессов обработки ТЗК путем оптимизации как схем формообразования и резания, так и средств их реализации. Поэтому общими принципами построения рациональных способов обработки ТЗК на стадии функционального проектирования станка являются:

- задание рационального распределения функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами станка;
- разработка или выбор эффективного метода обработки и реализующего его режущего инструмента;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающих благоприятные условия резания и работы механизмов станка, в частности, за счет замены возвратно-поступательных движений исполнительных органов вращательными;

- совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- введение движений для управления точностью формообразования, схемой или условиями резания.

На этих принципах основаны способы обработки ТЗК резцовыми головками (патенты РБ 5707, 6063, 6165, 6350), червячными фрезами (патент РБ 7846) и секторными инструментами (патенты РБ 553, 7041, 9765, 1550), которые различаются:

- типом и конструкцией применяемого режущего инструмента (резцовая головка, червячная фреза, дисковый инструмент);
- взаимным расположением инструмента и заготовки, формой траектории и направлением их относительного перемещения;
- кинематикой формообразования – сочетанием и соотношением скоростей и направлений элементарных движений, сообщаемых инструменту относительно заготовки;
- возможностями управления процессом формообразования и т. д.

Интенсификация процессов обработки этими способами достигается во многом благодаря тому, что процесс деления осуществляется непрерывно, так как совмещен с процессом формообразования. Высокую производительность обработки ТЗК резцовыми головками обеспечивает также схема, основанная на дискретно-непрерывном процессе деления (патент РБ 6350), которая позволяет увеличить число одинаковых по форме обработанных поверхностей, повысить универсальность инструмента и станка.

Следует отметить, что основная функция формообразования – образование заданной поверхности может быть обеспечена при обработке резанием или только кинематикой станка, или совместно кинематикой станка и инструментом. Перенесение функции формообразования на инструмент упрощает кинематику станка, что обеспечивает возможность реализации способов обработки на универсальных станках. На этом принципе основан данный способ обработки ТЗК эксцентрично установленным наклоненным секторным инструментом (патент РБ 9765), схема которого показана на рисунке 1.

Заготовке 1 и инструменту 2 сообщают согласованные вращательные движения B_1 и B_2 вокруг скрещивающихся осей и относительное движение подачи $П_3$ вдоль оси вращения заготовки, режущие элементы инструмента располагают по окружности в угловом секторе, не превышающем половины дуги окружности, инструмент устанавливают с эксцентриситетом e относительно геометрической оси, в 2 раза меньшем глубины f пазов и под углом ρ к оси вращения, величина которого определяются геометрией ТЗК. Благодаря эксцентричной установке инструмента исключено воз-

вратно-поступательное движение исполнительного органа станка, обеспечивающее движение врезания. Теоретически и экспериментально установлено, что реализуемая схема резания секторным инструментом обеспечивает плавное изменение нагрузки на режущие зубья при его врезании в заготовку и выходе из контакта с ней. Благодаря этому достигаются высокая виброустойчивость технологической системы и стойкость инструмента.

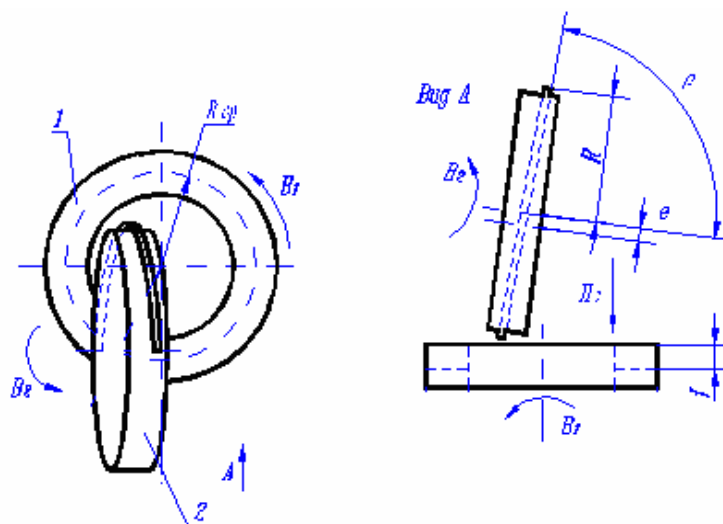


Рис. 1. Схема обработки ТЗК наклонным секторным инструментом

Таким образом, за счет рационального распределения функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами станка данный способ имеет простую в реализации структуру исполнительного движения и создает благоприятные динамические условия работы механизмов станка.

Применение эксцентрично установленного секторного инструмента позволило реализовать высокопроизводительный метод обработки ТЗК круговым протягиванием, при котором обработка паза на полную глубину осуществляется за один оборот инструмента при благоприятном с точки зрения динамики распределении срезаемого слоя между режущими зубьями. Наклонное расположение инструмента к оси вращения позволило совместить движения формообразования и деления. Благодаря этому производительность обработки ТЗК по сравнению с традиционной технологией возрастает в 2 – 4 раза при более высокой точности шага расположения пазов.

Данный способ обработки реализован в станках моделей ВС 50-9061 и ВС 30П-9253 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» для обработки индукторов АБС автомобилей, спроектированных на базе универсальных станков моделей ВС50 и ВС30П. Созданные способы обработки, станки и режущие инструменты решают научно-техническую задачу интенсификации процессов обработки ТЗК деталей машин.

ОБРАБОТКА КАНАЛОВЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. А. Данилов, А. А. Чепурной

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

На основе исследования геометрии круговых винтовых поверхностей и общих принципов синтеза схем формообразования разработана рациональная схема их обработки. Предложен вариант ее реализации на универсальном токарно-затыловочном станке, что позволило освоить производство импортозамещающей продукции.

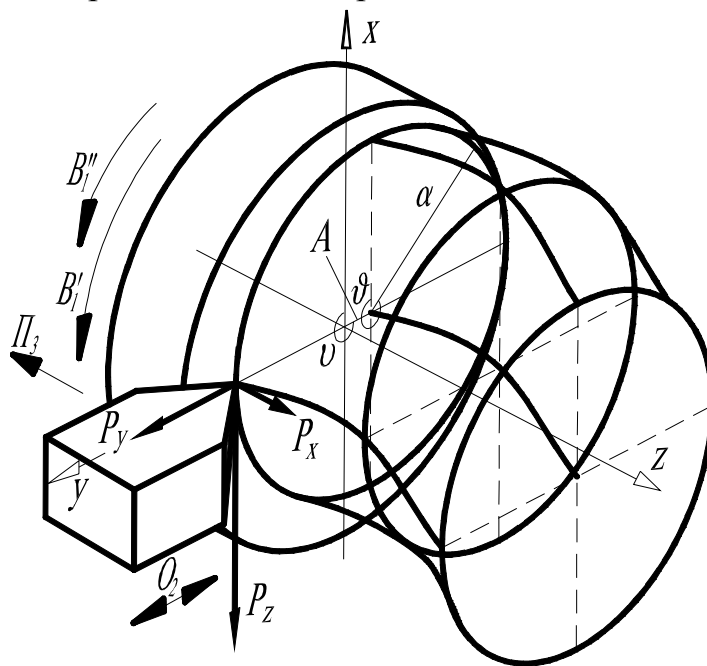
Каналовые винтовые поверхности применяются в рабочих органах винтовых насосов импортного технологического оборудования, приобретаемых в качестве запасных частей за рубежом. Поэтому создание и освоение технологии их изготовления имеет актуальное значение для отечественной промышленности. Эта задача решена на основе исследования геометрии и возможных схем формообразования каналовых винтовых поверхностей и кинематической структуры станков для их обработки.

Кинематически каналовая винтовая поверхность образуется как след при винтовом движении замкнутой линии, ограничивающей поперечное сечение поверхности. В частном случае, когда эта линия является эксцентрично расположенной относительно оси винтового движения окружностью, формируется круговая винтовая поверхность, например, ротора одновинтового винтового насоса. Статор такого насоса имеет внутреннюю рабочую поверхность в виде двухзаходней круговой винтовой поверхности, получаемой при отливке за счет применения специального знака с соответствующей каналовой винтовой поверхностью.

Для изготовления роторов и знаков необходимы специальные станки, которые отечественной промышленностью не производятся. В этой связи с экономической точки зрения актуально освоение производства импортозамещающей продукции с использованием модернизируемого оборудования иного назначения. Решение этой задачи связано с разработкой соответствующих схем обработки и средств их реализации.

При выборе схемы формообразования поперечное сечение каналовой винтовой поверхности целесообразно принять за ее образующую, а за направляющую – винтовую линию. Из-за переменной формы обе линии целесообразно создавать более простым в реализации методом следа, что соответствует обработке точением. Замкнутая линия при точении формируется вращением заготовки B , согласованным с качательным K или осцил-

Более простой в реализации является схема формообразования профиля поверхности, основанная на движении $\Phi_V(B_1O_2)$, показанная на рисунке 1. Преимуществом данной схемы профилирования кроме простоты реализации является широкая универсальность, так как указанными движениями могут быть сформированы различные замкнутые линии. Это позволяет обрабатывать на станке не только круговые, но и каналовые винтовые поверхности с иным профилем. Кроме того, на станке по единой схеме возможна обработка как наружных, так и внутренних каналовых винтовых поверхностей. Ее недостатком является ограниченная производительность обработки из-за возвратно-поступательного перемещения исполнительного органа с частотой, равной частоте вращения шпинделя.



Вторая производящая линия данной поверхности образуется винтовым движением подачи Φ_S , создаваемым согласованными вращательным B и поступательным Π движениями.

125

ровании образующей, а движение B_1'' вокруг этой же оси – направляющей винтовой поверхности. В частном случае, когда поперечное сечение представляет собой окружность, центр которой смещен относительно оси винтового движения, по рассмотренной схеме формируется прямая круговая винтовая поверхность, описываемая параметрическими уравнениями:

$$\begin{cases} x = A \cos \psi + a \cos(\theta + \psi) \\ y = A \sin \psi + a \sin(\theta + \psi) , \\ z = p\psi \end{cases}$$

где a – радиус производящей окружности; θ – угол поворота в поперечном сечении точки приложения нормали к винтовой поверхности; ψ – угол поворота поперечного сечения вокруг оси винтовой поверхности; A – расстояние от центра поперечного сечения до оси винтовой поверхности; $p = H / 2\pi$ – параметр винта; H – шаг винтовой поверхности.

Схема обработки канальной винтовой поверхности, основанная на указанных движениях формообразования, может быть реализована на специальном станке (патент РБ 4118) или на модернизированном станке другого назначения.

Кинематика и конструкция модернизируемого станка должны обеспечивать возможность:

- формирования поперечного сечения канальной винтовой поверхности, в частности, круговой;
- настройки расстояния между осью изделия и центром производящей окружности (эксцентриситета круговой винтовой поверхности);
- создания и настройки винтового движения в соответствии с шагом круговой винтовой поверхности.

Анализ геометрических параметров роторов винтовых насосов и технических возможностей станков показал, что указанным требованиям в достаточной мере соответствуют универсальные токарно-затыловочные станки, конструкция и кинематика которых позволяет создавать и настраивать исполнительные движения с необходимыми для обработки круговых винтовых поверхностей параметрами. Требуемая форма поперечного сечения канальной винтовой поверхности обеспечивается механизмом-профилятором, а ее шаг – настройкой станка.

Описанная схема формообразования канальных винтовых поверхностей реализована в лаборатории кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства Полоцкого государственного университета на токарно-затыловочном станке модели 1Б811, что позволило освоить по заказу промышленности производство роторов и знаков для изготовления статоров винтовых насосов.

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТАНКАХ

В. А. Данилов, А. И. Костюченко, Ю. Ю. Масальский, А. Н. Селицкий
Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Рассмотрены схемы профилирования моментопередающих поверхностей при предварительной и чистовой обработке. Показаны пути интенсификации процессов обработки и их реализации на универсальных станках.

Профильные моментопередающие соединения, обладая по сравнению со шпоночными и шлицевыми значительными эксплуатационными и технологическими преимуществами, находят еще ограниченное применение. Во многом это связано с отсутствием специального станочного оборудования и совершенных технологий для их производства, что обуславливает актуальность исследований и практических разработок по данной проблеме. Экономически целесообразно решение задачи на основе способов обработки профильных поверхностей, реализуемых на универсальных станках.

Традиционная схема точения профильных поверхностей основана на сообщении резцу возвратно-поступательного движения, согласованного с вращением заготовки. Способ реализуется как на специальных станках-профиляторах, так и на универсальных токарно-затыловочных станках. Этим способом возможно предварительное и окончательное точение на одном станке как наружных, так и внутренних профильных поверхностей с последующей их обработкой на нем по той же схеме формообразования поверхностно-пластическим деформированием (накатыванием, выглаживанием и т. п.).

Такая технология была реализована, например, на токарно-затыловочном станке модели 1Б811 при изготовлении для минского завода «Ударник» профильных деталей с синусоидальным контуром (валов, шестерен, муфт) модернизированного редуктора отбора мощности погрузчика ТО-18Б, в котором все шлицевые соединения и зубчатые муфты были заменены профильными [1].

Этот способ обработки имеет относительно невысокую производительность по сравнению с точением круглых валов из-за знакопеременных инерционных нагрузок, вследствие возвратно-поступательного движения

поперечного суппорта с частотой, в 2 – 5 раз превышающей частоту вращения шпинделя. Поэтому в серийном производстве профильных деталей целесообразно использовать более производительные схемы обработки, основанные на согласованных вращательных движениях инструмента и заготовки и замене возвратно-поступательного движения вращательным [2].

На этом принципе основаны способы обработки профильных поверхностей дисковыми, цилиндрическими, ротационными и комбинированными инструментами, реализуемые, например, на станке модели ВС 50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан».

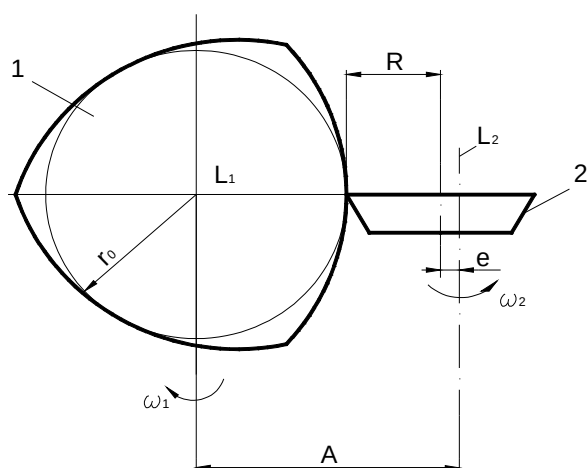


Рис. 1. Схема ротационного точения профильной поверхности

соответственно с угловыми скоростями ω_2 и ω_1 , отношение которых равно числу граней профильной поверхности.

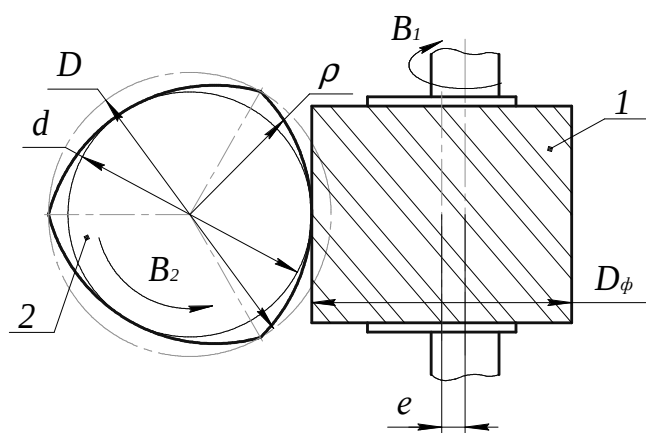


Рис. 2. Схема профилирования эксцентрично установленной фрезой

В частности, интенсификация процесса обработки синусоидальных поверхностей за счет исключения реверсивного движения инструмента обеспечивается специальным ротационным резцом (патент РБ 4541). Синусоидальная поверхность образуется при сообщении резцу 2, установленному с эксцентриситетом e (рис. 1), и заготовке 1 согласованных вращательных движений вокруг скрещивающихся под прямым углом осей L_2 и L_1 ,

Высокую производительность обеспечивает также способ обработки профильных валов эксцентрично установленной цилиндрической фрезой (рис. 2). Профилирование некруглой поверхности осуществляется методом обката при согласованных вращательных движениях B_1 и B_2 соответственно фрезы 1 и заготовки 2. Производящей поверхностью является цилиндрическая исходная инструментальная поверхность фрезы

1 диаметром D_ϕ , расположенная с эксцентриситетом e относительно оси ее вращения. За счет этого образуется выпуклый профиль, текущий радиус ρ которого изменяется от минимального значения, равного $d/2$, до его максимального значения $D/2$, где d (D) – диаметр вписанной (описанной) окружности профиля. Высота выступов профиля в два раза больше величины эксцентриситета e .

Профиль обработанной поверхности в этом случае имеет огранку, обусловленную схемой формообразования, что характерно для обработки по методу обкатки многолезвийными инструментами. При необходимости огранка может быть удалена шевингованием, шлифованием, опиливанием и другими методами.

Схема опилования (патент РБ 3124) представлена на рисунке 3, где B_1 – вращение заготовки, K_2 – качательные движения режущих элементов, обусловленные некруглостью профиля детали; Π_3 – движение подачи. Режущие элементы прижимаются к обрабатываемой поверхности специальным механизмом с усилием P . Данная схема является разновидностью копировальной обработки, когда функцию копира выполняет заготовка. При этом образующая некруглой поверхности воспроизводится согласованными движениями B_1 и K_2 , а ее направляющая (прямая линия) – перемещением Π_3 режущих элементов вдоль оси заготовки.

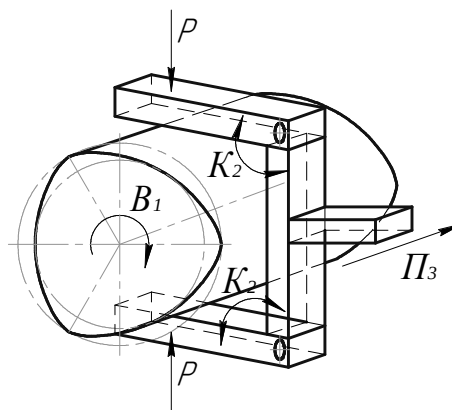


Рис. 3. Схема опилования профильной поверхности

В процессе обработки удаляются неровности над номинальной поверхностью (огранки), в результате чего уменьшается шероховатость обработанной поверхности. Точность же формы профиля детали обеспечивается на предыдущей операции, например, фрезерованием эксцентрично установленной фрезой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В. А. Конструкторско-технологическое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в трансмиссиях машин / В. А. Данилов, А. И. Костюченко, С. В. Спиридонов // Машиностроение: сб. науч. трудов. Вып. 17; под ред. И. П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», – 2001. – С. 209 – 214.
2. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск: Наука и техника, – 1995. – 264 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММ НАГРУЖЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ РЕЗАНИЯ

К. П. Петренко

*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
Кемерово*

Рассмотрены методики и результаты экспериментальных исследований формирования программ нагружения в процессах резания.

Проектирование технологических процессов упрочняющей механической обработки необходимо осуществлять с позиций технологического наследования (ТН). Эффективная оценка и прогнозирование свойств поверхностного слоя возможны на основе разработанной проф. В. Ю. Блюменштейном механики технологического наследования [1].

Согласно ее основным положениям, в процессах обработки и эксплуатации деталей машин происходит непрерывное накопление деформации и истощение запаса пластичности металлом поверхностного слоя. Основными параметрами механического состояния являются накопленная степень деформации сдвига Λ , показатель напряженного состояния Π , степень истощения запаса пластичности Ψ .

При внедрении инструмента в поверхностный слой возникает очаг деформации (ОД), в котором вдоль линий пластического течения металла (линий тока) происходит накопление деформации и формирование свойств поверхностного слоя.

Ключевым элементом механики технологического наследования является программа нагружения (ПН), представляющая собой зависимость накопленной степени деформации сдвига Λ от показателя напряженного состояния Π . ПН имеет три участка к вазимонотонной деформации, на которых накопление деформации и истощение запаса пластичности происходит в условиях изменяющегося показателя напряженного состояния. Программа нагружения формируется под воздействием режимов обработки и определяет характер накопления деформации и формирование наследуемых свойств поверхностного слоя.

В структуру типового технологического процесса упрочняющей механической обработки входят резание и поверхностное пластическое деформирование (ППД). Окончательное формирование свойств поверхностного слоя происходит на операциях ППД с учетом ранее накопленных свойств. Операции резания формируют требуемую форму и размеры изде-

лия. Исследования показали [2], что формирование программ нагружения в процессах резания и ППД подчиняется общим закономерностям и может быть описано аналитическими моделями на основе параметров ОД.

С целью проверки корректности полученных аналитических моделей были проведены экспериментальные исследования формирования программ нагружения по схеме свободного ортогонального резания. Материалами для исследования являлись стали 45, 12ХН3А, 30ХГСА, а также алюминиевый сплав АК6. Подача S варьировалась от 0,025 м/мин до 0,1 м/мин, толщина срезаемого слоя a – от 0,1 мм до 1 мм, радиус округления режущей кромки ρ – от 0,15 мм до 2 мм, передний угол γ – от -10° до 35° . Геометрия инструмента обеспечивалась обработкой стандартных пластин из твердого сплава ВК8 на оптико-шлифовальном станке и державками, изготовленными из стали 40Х.

Компоненты напряженно-деформированного состояния и параметры механического состояния поверхностного слоя рассчитывались методом делительных сеток (МДС) и методом конечных элементов (МКЭ). При моделировании МКЭ заготовка жестко закреплялась, в нее внедрялся абсолютно жесткий индентор (резец) и смещался в горизонтальном направлении на величину подачи. На рисунке 1 изображена деформированная делительная сетка для образца № 16 (обрабатываемый материал – сталь 45, скорость резания 0,1 м/мин, толщина срезаемого слоя 0,3 мм, передний угол 35°).

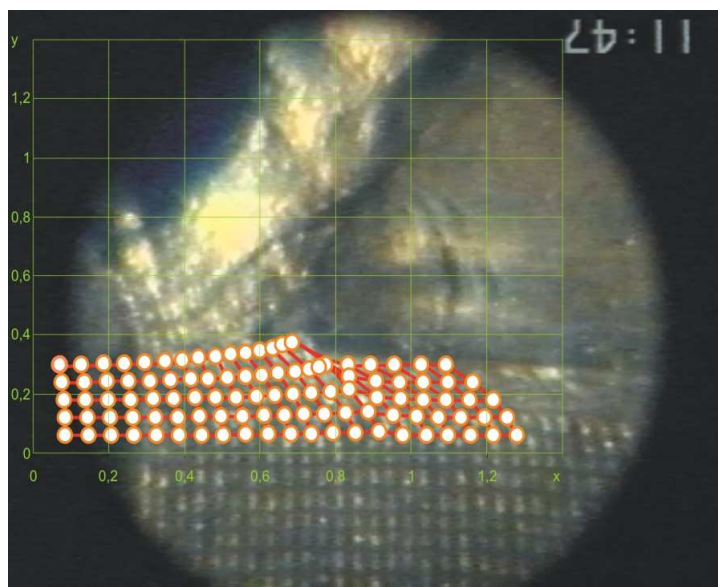


Рис. 1. Деформированная делительная сетка для образца № 16

Интенсивность напряжений, рассчитанная с помощью МКЭ, для образца № 16 показана на рисунке 2.

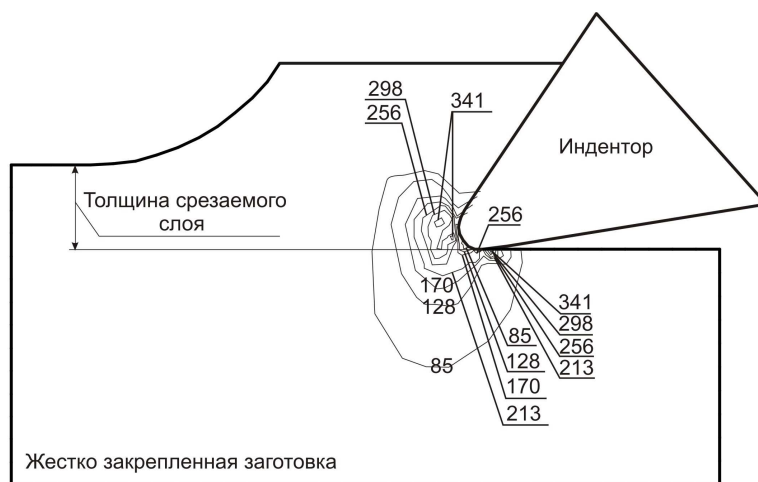


Рис. 2. Интенсивность напряжений для образца № 16, МПа

Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанных аналитических моделей формирования программ нагружения в процессах резания. На рисунке 3 показаны аналитическая и экспериментальная программы нагружения для образца № 16.

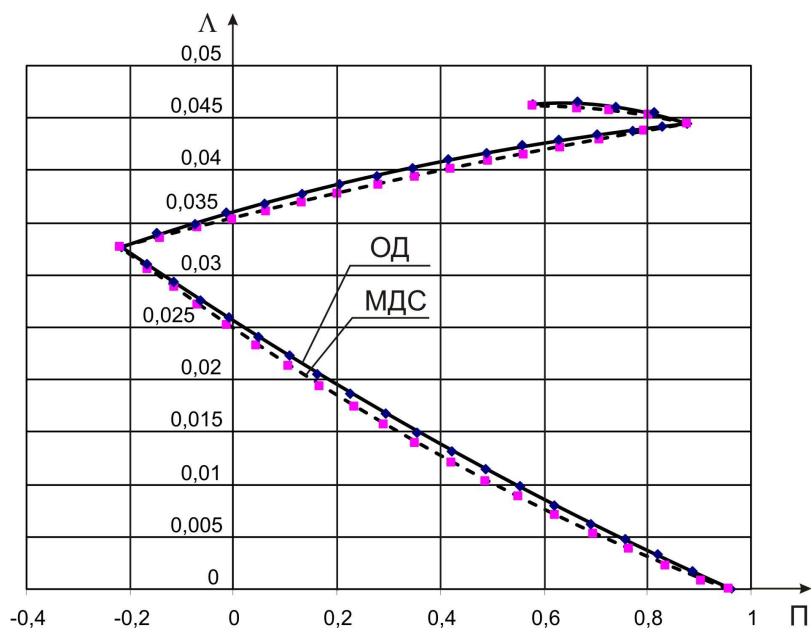


Рис. 3. Аналитическая (ОД) и экспериментальная (МДС) программа нагружения при резании

ЛИТЕРАТУРА

1. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, – 2007. – 400 с.
2. Блюменштейн, В. Ю. Аналитическое описание программ нагружения на стадиях механической обработки [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, К. П. Петренко // Вестник КузГТУ. – 2009. – №6. – С. 77 – 83.

ВЛИЯНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ НА ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ШНЕКОВЫХ СВЕРЛАХ

Э. М. Дечко, А. В. Воронович

Белорусский национальный технический университет, Минск

Применение современных методов компьютерного моделирования режущих инструментов позволило исследовать деформации и напряженное состояние отдельных конструктивных параметров шнековых сверл при изменении нагрузок в процессе резания

Сверла для глубокого сверления работают с большими вылетами и под действием крутящего момента и осевой силы испытывают одностороннее кручение, сжатие и продольный изгиб. Известны исследования процесса резания при сверлении сталей и чугунов шнековыми сверлами. Теоретически и экспериментально доказано, что процесс резания сопровождается низкочастотными колебаниями [1, 2, 3].

Модель шнекового сверла разработана в пакете Solid Works. Твердотельная 3D-модель шнекового сверла допускает добавление, изменение различных параметров для исследования влияния нагрузок на инструмент и зону резания [5, 6].

Использование метода конечных элементов, реализованного в пакете ANSYS Workbench, позволило получить новые результаты по деформационным процессам и напряжениям в транспортирующей и режущей частях сверл, представить минимальное сечение транспортирующей части, показать увеличение износа сверла вдоль режущей кромки по задней поверхности по направлению к уголку и изменение положения режущей кромки при нагрузках.

Согласно исследованиям Вильнюсского завода сверл удлинённые, длинные и сверла глубокого сверления выходят из строя не в результате износа, а в связи с поломкой [4]. Они, как правило, ломаются на расстоянии $2/3$ длины от вершины сверла. Нами на 3D-модели было определено минимальное сечение, по которому ломаются сверла. В результате моделирования подтверждено, что сверло ломается по минимальному сечению, имеющему сложную винтовую поверхность (рис. 1).

В работе [4] приводятся данные, что минимальный разрез не совпадает с поперечным сечением винтового тела. Винтовая поверхность слома перпендикулярна винтовым линиям соответствующих точек винтового тела. По направлению к оси сверла угол винтовой линии ω уменьшается, и поверхность слома, перпендикулярная к углу ω , получается переменновинтовой. Посредством инструментов пакета Solid Works были определены минимальная площадь сечения сверла диаметром 10 мм, $\omega = 60^\circ$ и площадь его поперечного сечения (рис. 1).



Рис. 1. Поперечное (а) и минимальное (б) сечения шнекового сверла

Площадь сложно-винтовой поверхности на 10...12% меньше площади сечения по нормали к оси сверла.

Деформации отдельных конструктивных элементов шнековых сверл исследовались на 3D-моделях сверл $d = 10$ и $d = 12$ мм в пакете ANSYS Workbench посредством их нагружения крутящими моментами и силами резания, полученными ранее для данного процесса [5, 6].

При раскручивании спирали и удлинении сверла под действием крутящего момента установлено, что при раскручивании спирали диаметр сверла изменяется по длине, например, с 10 мм до 10,015 мм на длине 100 мм (рис. 2).

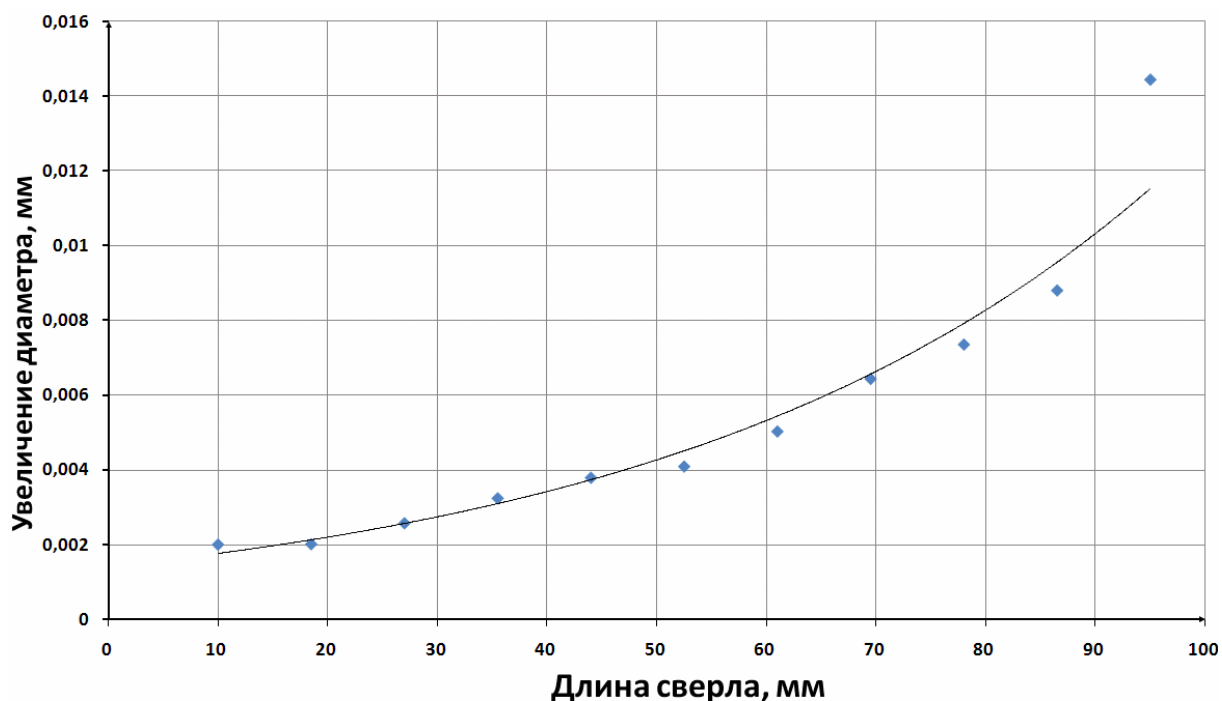


Рис. 2. Увеличение диаметра транспортирующей части сверла вдоль оси под действием крутящего момента

Исследованы также деформации режущего лезвия в направлении от оси сверла к уголку. При приложении крутящего момента режущая кромка сверла имеет вид подобно максимальным напряжениям на режущей кромке (рис. 3).

При приложении только осевой силы происходит вдавливание тела сверла в обработанную поверхность зоны резания, и режущая кромка сверла деформируется сложным образом (рис. 3).

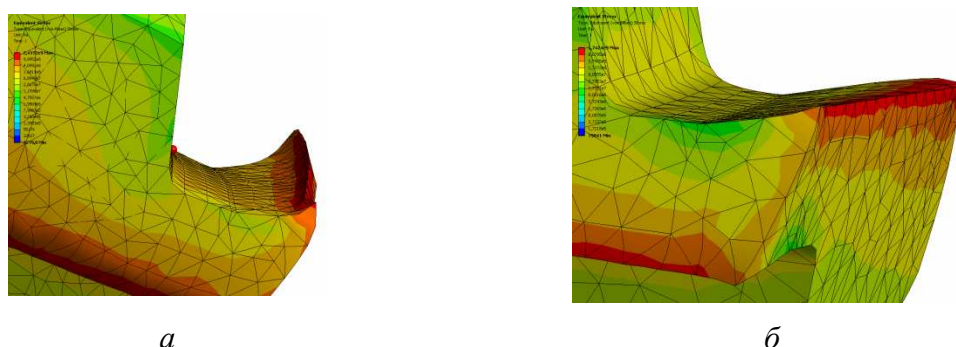


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние режущей кромки:
а) нагрузка P_o , коэффициент увеличения 100; б) нагрузка $M_{кр}$ и P_o

Установлено, что деформации режущей кромки носят нелинейный характер: кромка не только меняет свое положение вместе с частью передней поверхности сверла, но и изгибается примерно на половине длины режущей кромки. Это, возможно, связано с тем, что более жесткая сердцевина внедряется в заготовку, а менее жесткая часть режущей кромки опускается.

При анализе деформированного состояния режущей кромки отмечено, что картина деформаций на задней поверхности главных режущих лезвий (рис. 3, б, в) подобна рисунку износа (рис. 4), т. е. деформации режущей части оказывают влияние на вид износа.

Однако, если на рисунках 3, а и 3, б в качестве силового фактора действует только осевая сила P_o , сходство прослеживается в полной мере, то при сравнении рисунков 3, а и 3, в действуют осевая сила P_o и крутящий момент $M_{кр}$, область рядом с перемычкой выглядит более широкой, чем на изношенной поверхности.

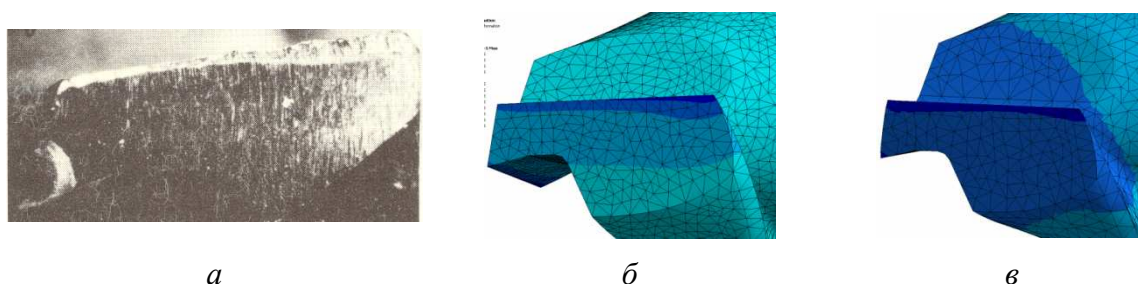


Рис. 4. Износ вдоль режущего лезвия:
а) деформации режущей части сверла при нагрузке P_o ; б) при нагружении P_o и $M_{кр}$

Таким образом, при исследовании процесса формирования вида износа в совокупности с другими факторами необходимо учитывать зону контакта, трение, температуру резания и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дечко, Э. М. Сверление глубоких отверстий в сталях / Э. М. Дечко. – Минск : Выш. шк., 1979. – 232 с.
2. Костюкович, С. С. Точность обработки глубоких отверстий / С. С. Костюкович, Э. М. Дечко, В. И. Долгов. – Минск : Выш. шк., 1978. – 144 с.
3. Дечко, Э. М. Деформация шнековых сверл / Э. М. Дечко, Л. А. Колесников, В. В. Брилевский // Машиностроение / Белорус. гос. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Вып. 24. – С. 108–111.
4. Жилис, В. И. Исследование и анализ спиральных сверл разных конструкций : дис. ... канд. техн. наук / В. И. Жилис. – Минск, 1968. – 303 с.
5. Огородникова, О. М. Конструкционный анализ в среде ANSYS : учеб. пособие / О. М. Огородникова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2004. – 68 с.
6. Басов, К. А. ANSYS: Справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : LVR Пресс, 2005. – 640 с.

УДК 658.512

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР ТП ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ В СТАНКОСТРОЕНИИ

**Н. В. Беляков, В. И. Ольшанский, Ю. Е. Махаринский,
Витебский государственный технологический университет
Н. Н. Попок**

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Предложены методы формирования конструктивно-технологических моделей корпусных деталей, комплексных технологических процессов и система классификации элементов конструкции. Методы и модели использованы для создания САПР ТП корпусных деталей на базе ОАО «Институт БЕЛОРГСТАНКИНПРОМ».

Для автоматизации создания комплекта технологической документации на изготовление корпусных деталей на станкостроительных предприятиях в рамках задания 01.26 Региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области» разработана САПР технологических процессов (ТП) изготовления корпусных деталей средних габаритных размеров. Задание выполнялось совместно с ОАО «ВИСТАН» и ОАО «Станкозавод Красный Борец» на базе САПР ОАО «Институт БЕЛОРГСТАНКИНПРОМ» с использованием методик, моделей и алгоритмов, разработанных в УО «ВГТУ» и УО «ПГУ».

Целью исследований являлось создание теоретических основ, принципов и методов разработки конструктивно-технологической модели заготовки, классификации объекта производства и алгоритмизация процессов проектирования.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи: провести анализ существующих САПР ТП; разработать алгоритм функционирования САПР ТП изготовления корпусных деталей, метод формирования комплексных технологических процессов для корпусных деталей на базовых предприятиях; разработать систему классификации конструктивных элементов (функциональных модулей (ФМ)) базовых предприятий.

Для проведения анализа существующих САПР ТП проанализировано 320 информационных источников. В результате анализа установлено, что наибольшее распространение в странах СНГ получило порядка 25 различных САПР-систем. Это такие системы, как: ADEM, NATTA, Pro/TechDoc, SprutTP, SWR-технология, TECHCARD, Technologi CS, Techwind, T-FLEX Технология, «Автомат», ВЕРТИКАЛЬ, Импуль, КАРУС, Темп, Технолог Гепард, Компас-Автопроект, ТехноПро. Однако ни одна из систем не позволяет в автоматизированном режиме формировать технологические процессы изготовления корпусных деталей. Это обусловлено тем, что не до конца разработаны методики и формальные процедуры проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей. Принятие проектных решений часто основывается на опыте и интуиции проектировщика.

Алгоритм функционирования САПР ТП изготовления корпусных деталей предлагается строить по концепции построения технологических процессов на основе трех методов организации производства (типизации технологических процессов, групповой обработки деталей, модульной технологии). Концептуально технологический процесс предлагается формировать на основе идей типовой и групповой технологии с дальнейшим использованием функциональных модулей и маршрутов их обработки в качестве дополнительных поверхностей.

Основой метода формирования типовых комплексных технологических процессов является классификация и группирование деталей, видов работ и технологических процессов. Для создания комплексных деталей и технологических процессов использован эволюционный способ на основе классификации элементов конструкторских архивов ОАО «ВИСТАН» и ОАО «Станкозавод Красный Борец». Детали, изготавливаемые на предприятии, делились на ряд технологически подобных. В каждой группе выбрана базовая (обычно наиболее сложная) деталь. Технологический процесс ее изготовления считается базовым. Другие детали данной группы – присоединяемые. Сопоставляя технологические процессы изготовления базовой и присоединяемой деталей, сформировали обобщенные технологические процессы. Используя массив дополнительных поверхностей (ФМ) можно получить комплексную деталь и технологический процесс.

При анализе чертежей корпусных деталей средних габаритных размеров ОАО «ВИСТАН» и ОАО «Станкозавод Красный Борец» выделен ряд классификационных признаков деталей, разработана структура клас-

сификации и классификаторы деталей. Все классы предлагается делить на 5 и 6 подклассов. В свою очередь внутри подклассов имеются группы, внутри групп – подгруппы, виды и типы.

Для создания метода формирования комплексных технологических процессов проведен анализ частных технологических процессов изготовления деталей в технологических бюро станкостроительных заводов ОАО «ВИСТАН» и ОАО «Станкозавод Красный Борец». В общей сложности было проанализировано 350 технологий изготовления деталей средних габаритных размеров. Для проведения исследований технологические процессы изначально распределялись по применимости их в станках и по служебному назначению, что позволило распределить технологические процессы по классификационным признакам деталей. Детали, отнесенные к одному типу, характеризуются общностью процессов обработки основных поверхностей.

Для исследования общности технологии и определения базовых поверхностей и порядка смены баз технологические процессы предлагается представлять в виде сравнительного описания операций. Установлено, что на уровне подгрупп детали обладают общностью технологии и на них становится возможным сформировать комплексный технологический процесс (КТП).

Для формирования образа комплексной детали главным функциональным модулям присваиваются номера, определяющие деталь на множестве признаков подгруппы. В пределах каждой комплексной детали частные детали обладают общностью конструктивных признаков и отличаются между собой некоторыми размерами, не влияющими на технологию изготовления. Обработка деталей должна осуществляться по единому плану операций с одинаковым числом установок на однородных станках и приспособлениях. После анализа деталей группы по конструктивным и конструкторско-технологическим признакам выделяются общие главные поверхности для всех деталей группы. Предложен формат массива для представления состава конструктивных элементов деталей. Массив позволяет сформировать образ комплексной детали. При разработке комплексного технологического маршрута обработки на основе сравнения ТП становится возможным определить последовательность технологических операций.

Для создания системы классификации конструктивных элементов базовых предприятий разработана библиотека составных частей деталей, из которых можно при конструировании формировать основные формы детали, и библиотека комплексов дополнительных поверхностей, которые используются для обогащения основных форм. Унификация комплексов поверхностей создает основу для унификации операционных ТП, схем обработки комплекса поверхностей, фрагментов планов обработки, совмещений при обработке комплекса поверхностей, вспомогательного, режущего и мерительного инструментов. Классификатор комплексных функциональ-

ных модулей деталей представляет собой систему, в которой модули размещены по определенным признакам и принципу, и предназначен для выполнения задачи создания конструкторско-технологической модели заготовки. Структурный состав частного модуля формируется методом адресации из комплексного ФМ.

Методы и модели использованы для создания системы управления базами данных при разработке САПР ТП на базе ОАО «Институт БЕЛОРГ-СТАНКИНПРОМ». САПР ТП используется на базовых предприятиях в соответствии с программой освоения для проектирования технологических процессов изготовления деталей для серийных и опытных образцов станков и для реализации (с последующей адаптацией) прочим потребителям.

УДК 621.787:620.179.17

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

И. В. Мирошин

Кузбасский государственный технический университет, Кемерово

Предложен технологический процесс упрочняющей обработки с учетом явления технологического наследования. Особенностью предложенного процесса является то, что расчет и назначение параметров режима упрочняющей обработки осуществляется на основе контроля формирования деформационных параметров качества поверхностного слоя акустико-эмиссионным методом.

На основе результатов научных исследований предложен технологический процесс упрочняющей обработки с учетом явления технологического наследования. Состояние поверхностного слоя оценивается с использованием интегральных параметров механического состояния, таких как степень деформации сдвига Λ и степень исчерпания запаса пластичности Ψ , контроль и управление которыми с использованием методики акустико-эмиссионного (АЭ) контроля позволяет обеспечить заданную циклическую долговечность детали [1].

Использование полученных результатов позволяет назначать рациональные режимы обработки, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя и циклическую долговечность детали. Для этого необходимо решить задачу расчета накопленных деформаций, исчерпания запаса

пластичности металла и качества поверхностного слоя детали в зависимости от параметров режима обработки. С этой целью была разработана методика АЭ контроля, включающая программу для ЭВМ и позволяющая решать задачу прогнозирования долговечности, как в процессе изготовления, так и эксплуатации изделия [2].

Для контроля накопления и трансформации параметров качества поверхностного слоя была использована модель, полученная для оценки степени истощения запаса пластичности от параметров сигнала акустической эмиссии [3]:

$$\Psi = a_1 + b_1 \cdot (\ln(c_1 + (c_2 \cdot \exp(b_2 + c_2 \cdot t))))). \quad (1)$$

Здесь $t \equiv \tau$ выступает как обобщенный критерий, зависящий от параметров очага деформации, которые в свою очередь определяются технологическими факторами; a_1, b_1 – коэффициенты, зависящие от физико-механических и геометрических параметров обрабатываемых изделий; c_1 – выравнивающий коэффициент; b_2, c_2 – коэффициенты, зависящие от условий текущего нагружения и определяемые по сигналу АЭ.

При решении задачи исходными данными на операциях механической обработки являются: материал детали, характеризуемый исходной твердостью HV_0 , кривой течения в виде $\sigma_i = \sigma_i(\epsilon)$ и диаграммой пластичности в виде $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$; геометрические параметры режущего и деформирующего инструментов $\rho, \alpha, \gamma, \phi, \phi_1, R_{\Pi P}, D_p$; толщина срезаемого при резании слоя a ; действительный натяг ролика h_δ ; подача S ; частота вращения детали n ; диаметр детали D_δ .

Задача решается в следующей последовательности.

1. По известным моделям в зависимости от заданных режимов рассчитываются геометрические параметры очага деформации при резании и ППД, определяющие его форму и размеры [1].

2. Определяется время прохождения очага деформации вдоль линии тока материальной точкой поверхностного слоя.

3. С использованием полученной на стадиях механической обработки акустико-эмиссионной информации определяется величина накопленной энергии сигнала АЭ и выделившаяся мощность (1). Значение степени истощения запаса пластичности на поверхности определяется по модели (1), измененной с учетом технологической наследственности и представленной в следующем виде

$$\Psi_0 = -1,345 + 0,143 \cdot (\ln(25000 + W)). \quad (2)$$

4. Рассчитывается степень деформации сдвига на поверхности Λ_0 по формуле (данная модель корректна для значений $\Psi = 0,2 \dots 0,8$).

$$\Lambda_0 = 0,3 \cdot \ln(20 \cdot \Psi). \quad (3)$$

5. Рассчитывается распределение Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя после механической обработки с текущими режимами по формулам (4) и (5) [1, 4]:

$$(\Lambda_{\text{мех}})_h = (\Lambda_{\text{мех}})_0 \exp(-5,52h^{1,5}) + 0,01. \quad (4)$$

$$\Psi_{\text{мех}} = 1,064 \exp\left(-2\left((\Lambda_{\text{мех}})_h - 1,27\right)^2\right) \quad (5)$$

6. Рассчитывается циклическая долговечность, которая определяется механическим состоянием поверхностного слоя.

Исходными данными для расчета циклической долговечности являются:

- численное амплитудное значение эксплуатационного напряжения σ_a на данной глубине, МПа;
- глубина h , на которой рассчитывается циклическая долговечность;
- степень исчерпания запаса пластичности на поверхности после механической обработки Ψ_0 ;
- численное значение степени деформации сдвига на поверхности детали $(\Lambda_{\text{мех}})_0$;
- численное значение степени деформации сдвига на данной глубине после механической обработки $(\Lambda_{\text{мех}})_h$;
- степень исчерпания запаса пластичности на данной глубине после механической обработки $\Psi_{\text{мех}}$;
- численное значение компоненты тензора остаточных напряжений после механической обработки $(\sigma_{\text{ост}})_x$ на данной глубине в МПа.

Методика была использована при проектировании технологического процесса механической обработки оси колесной пары весоповерочной тележки (сталь 45, 160–180HV), изготавливаемой в условиях ООО Инженерный центр «АСИ», г. Кемерово.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

2. Программа для ЭВМ № 2008610463 Российская Федерация. Расчет циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии [Электронный ресурс] / В.Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, И. В. Мирошин; заявитель и правообладатель И. В. Мирошин. – № 2007614816; заявл. 30.11.07; рег. 24.01.08.
3. Мирошин, И. В. Технологическое обеспечение наследуемых параметров качества при упрочняющей обработке на основе выбора рациональных режимов методом акустической эмиссии [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / И. В. Мирошин – Барнаул, 2008.
4. Кречетов, А. А. Разработка методики проектирования технологических процессов обкатывания на основе раскрытия наследственных закономерностей влияния состояния поверхностного слоя на циклическую долговечность деталей машин [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / А. А. Кречетов. – М., 2003.

УДК 621.791: 621.192

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ МАТЕРИАЛА ВОССТАНОВЛЕННОЙ ДЕТАЛИ

В. Э. Завистовский

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Металлические покрытия представляют собой сложные многокомпонентные неравновесные системы, обладающие избыточной свободной энергией, обусловленной наличием в слоях большого количества микро- и макродефектов структуры в частицах присадочного материала. В процессе наплавки, как в наплавленном металле, так и в околошовной зоне могут возникать дефекты, которые снижают эксплуатационную способность наплавленного металла. Покрытие, получаемое напылением – это слоистый материал, состоящий из деформированных напыленных частиц, соединенных между собой по контактными поверхностям сварными участками.

По мере нагревания системы порошковый слой – подложка в ней возникают сложные физико-химические процессы, направленные в соответствии с общими принципами термодинамики в сторону уменьшения избыточной свободной энергии. Интенсивность этих процессов возрастает с повышением температуры и существенно зависит от наследственных свойств наносимого порошка (микро-и макродефектов, химически взаимодействующих реагентов и т.д.). Микродефекты распределены с некоторой плотностью в окрестностях макродефектов и обеспечивают локальное термодинамическое равновесие указанной системы. На рисунке 1 представлена форма и строение частиц порошка различных сплавов.

Структура слоя, сформированного за один проход, неоднородна и определяется различными размерами и энергетическим состоянием – тем-

пературой и скоростью частиц, находящихся в периферийной и центральной зоне двухфазового потока, состоящего из частиц порошка и газа. Образование покрытия последовательной укладкой множества деформирующихся частиц неизбежно приводит к появлению микропустот, в первую очередь, на стыках частиц [1]. Покрытие формируется в атмосфере, поэтому микропустоты заполняются газом, что ухудшает свойства границ. Вследствие большой шероховатости покрытия, быстрого растекания и кристаллизации частиц, в зоне контактов с поверхностью ранее нанесенных частиц остаются дефекты и полости, которые образуются также вследствие выделения газов, растворенных в расплавленных частицах.

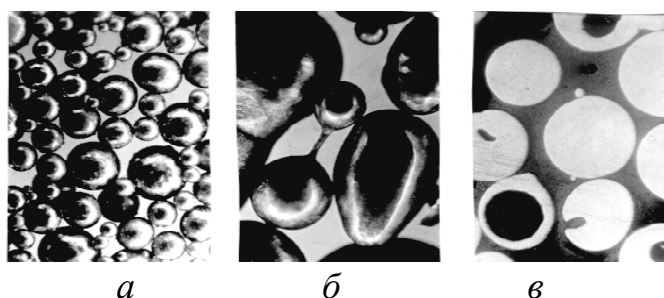


Рис. 1. Форма и строение частиц порошка:

- а)* ПГ-СР4 (фракция менее 200 мкм); *б)* ПГ-СР2 фракция (400 – 500 мкм);
в) внутренние поры в частицах порошка ПГ-СР3 (фракция 200 – 300 мкм)

К числу дефектов напыленных покрытий относятся отслоение или вздутие покрытия из-за его плохой адгезии к основному металлу, трещины, сплошная пористость, низкая твердость, неоднородность структуры и др.

Для газопламенного напыления часто используются порошки системы $Ni-Cr-B-Si$, которые являются самофлюсующимися. Для таких покрытий характерны: пониженная прочность сцепления на границах между частицами и слоями, обусловленная неполным схватыванием, а также повышенным содержанием оксидов, нитридов, пор и различных включений в пограничных областях; пористость, возникающая в результате газовыделения и кристаллизации частиц с высокими скоростями, а также выплеска материала покрытия при ударе частиц о подложку [2]. Покрытия имеют различную твердость и микротвердость по поверхности и глубине, неоднородный химический состав, большое количество составляющих микроструктуры. В отдельных частицах и во всем покрытии формируются значительные внутренние напряжения, приводящие к образованию микротрещин.

Прочность сцепления газотермических покрытий с поверхностью определяется совместным влиянием структурных дефектов границы раздела и остаточными напряжениями в ее плоскости. Структурные дефекты возникают из-за неполного контакта деформированных напыленных частиц с напыляемой поверхностью и неполного развития физико-химических

связей между контактирующими поверхностями. Остаточные напряжения обусловлены в основном различными теплофизическими и физико-механическими свойствами материалов покрытия и основы, а также разной их зависимостью от температуры.

Физическая неоднородность металла покрытия связана с несовершенством его кристаллической решетки. Особенно много дефектов возникает при дендритной кристаллизации, характерной для наплавленного металла. Ветви дендритов имеют различную пространственную ориентацию, а кристаллиты – блочную структуру, усиливаемую из-за скопления между ветвями дендритов примесей и дислокаций. При наплавке кристаллизующийся металл находится под воздействием растягивающих напряжений, возникающих вследствие несвободной усадки наплавленного металла, который в процессе охлаждения подвержен пластической деформации. Если же процесс нарастания напряжения происходит тогда, когда металл уже прошел твердожидкое состояние и приобрел достаточную прочность и пластичность, то возникшие напряжения лишь вызовут пластическую деформацию и образование кристаллизационных трещин не произойдет [3]. Холодные трещины возникают как по границам зерен, так и по телу зерна.

Поры в наплавленном металле представляют собой округлые пустоты, расположенные отдельными группами или цепочками внутри металла и на его поверхности. Поры возникают в процессе первичной кристаллизации. Шлаковые включения образуются вследствие плохой очистки от шлака поверхности предыдущих слоев при многопроходной наплавке; затекания шлака в несплошности металла, возникающие в результате подворотов, наплывов и других дефектов; применения электродов с чрезмерно тугоплавким покрытием; большой скорости наплавки и т.д.

Все дефекты и трещины, подчиняются некоторой закономерности распределения по количеству и размерам. Это распределение в совокупности с локальным напряженным состоянием и средой определяют потенциальные центры возникновения трещины. Чаще всего трещина берет начало от какого-нибудь небольшого поверхностного дефекта детали по истечении инкубационного периода конечной продолжительности. После того как трещина достигла критической глубины, происходит быстрое разрушение.

Наличие дефектов обусловлено как технологией восстановления деталей, так и его эксплуатацией. Отказ материала с покрытием в значительной степени определяется наличием дефектов в металле и материале покрытия, а также их взаимодействие с частицами присадочного материала. Механическая обработка таких деталей приводит к изменениям структуры поверхностного слоя; ранее скрытые дефекты и поры выходят на поверхность, являясь очагами разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завистовский, В. Э. Параметрическая надежность восстановленных деталей машин / В. Э. Завистовский // Вестник ПГУ. Технические науки. Серия В. – 2009. – №2. – С. 44 – 47.
2. Витязь, П. А. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильющенко. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 583 с.
3. Завистовский, В. Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В. Э. Завистовский. – Новополоцк : ПГУ, 1999. – 144 с.

УДК 621.7

АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСТОЧНИКАМИ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ЭНЕРГИИ

В. А. Данилов, Р. А. Киселёв

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

В. С. Крутько

ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск

Рассмотрены преимущества и особенности построения технологического оборудования агрегатно-модульного типа с применением источников концентрированной энергии, пути обеспечения его универсальности.

Агрегатно-модульное построение технологического оборудования на базе автономных унифицированных компонентов определенного функционального назначения имеет ряд технико-экономических преимуществ:

– гибкость системы проектирования – возможность построения множества компоновок разнообразного технологического оборудования из одних и тех же модулей;

– технологическая приспособляемость оборудования, позволяющая, на базе одного станка создавать, исходя из требований реализуемого технологического процесса, в короткие сроки с применением ограниченного комплекта модулей и других унифицированных элементов оборудование с необходимыми функциональными возможностями;

– допустимость при модернизации расширения технологических возможностей или повышения производительности оборудования за счет введения дополнительных модулей;

– обеспечение в заданном объеме выпуска оборудования при снижении его стоимости благодаря применению централизованно изготавливаемых узлов, агрегатов и различных комплектующих;

- повышение надежности оборудования за счет применения апробированных компонентов;
- улучшаются условия эксплуатации оборудования, его диагностики, технического обслуживания и ремонта и т.д.

Применение агрегатно-модульного принципа эффективно для оборудования со схожими кинематикой формообразования, используемыми физико-механическими и другими процессами. Например, ряду методов обработки, характеризующихся высокой концентрацией энергетического потока (гидроабразивная, лазерная, плазменная резка и др.), присущи общие приемы осуществления, основанные на многокоординатном перемещении энергетического потока, воздействующего на материал заготовки. Это позволяет применять в соответствующем оборудовании однотипные модули.

Анализ необходимых технологических блоков для осуществления этих методов обработки, а также выделение в них общих элементов, объединенных функциональным назначением, показывает, что ими в рассматриваемом оборудовании являются исполнительные устройства с приводами координатных перемещений и система управления. Поэтому эти элементы в большей степени соответствуют агрегатно-модульному построению оборудования. Такой метод построения основан на соблюдении принципов совместимости структурных компонентов оборудования и предъявляет определенные требования к проектированию, в частности:

- возможность стыковки отдельных модулей с обеспечением передачи информации и энергии, как между ними, так и через них;
- функциональную согласованность и дополняемость отдельных модулей, что позволяет, например, существенно повысить производительность оборудования для раскроя материала, за счет обеспечения возможности одновременной работы нескольких модулей;
- технологическая и функциональная надежность и безопасность создаваемого оборудования.

Изложенное выше позволяет определить основные задачи разработки технологического оборудования агрегатно-модульного типа с источниками концентрированной энергии на стадии функционального и компоновочного проектирования:

1. Выработка общей концепции построения создаваемого технологического оборудования, определяющей тип информационного преобразования, механизмы энергетического и силового воздействия на материал заготовки и элементы системы. Здесь необходимо обосновать физические процессы, обеспечивающие эффективное разрушение материала, определить систему координатных перемещений с позиции формирования траектории для достижения требуемых универсальности и точности оборудования,

механику механизмов перемещения носителя энергетического потока в координатной системе станка, выбор системы управления и т.д.

2. Обоснование концепции построения компоновки, определяющей необходимость и достаточность модулей системы исходя из требуемой универсальности оборудования, их сопряжение и относительную ориентацию, обусловленную технологией обработки. Качество компоновки оценивается через характеристики рабочего поля, определяющие технологические возможности оборудования.

3. Анализ характеристик координатных систем, определения требований к быстродействию, точности и жесткости элементов системы, исходя из технологических и других требований.

4. Разработка универсальных модулей, а также соединительных элементов между модулями, обеспечивающих передачу потоков информации и энергии при универсальности, позволяющей использовать их в различных системах координат.

5. Разработка в обоснованных случаях модулей, основанных на механизмах-построителях, например циклоидального типа, позволяющих решать технологические задачи более экономично по сравнению с ЧПУ, что может быть целесообразно в условиях серийного и массового производства.

В компоновках высокоэнергетического оборудования для раскрытия материала целесообразно использовать как традиционные прямоугольные, так и криволинейные системы координатных перемещений, которые определяют кинематику обрабатываемой системы и рабочее поле технологического оборудования. Позиционирование и непрерывное перемещение рабочего элемента в криволинейной системе координат обеспечивается координатными устройствами иного типа, в частности, состоящими из вращающихся звеньев. Их использование, несмотря на определенные сложности реализации, создает определенные преимущества, как в технологическом, так и в эксплуатационном плане, обусловленные, в частности, формой рабочего поля. Объединение обеих схем построения координатных устройств обеспечивает универсальность создаваемого оборудования, необходимую, например, для раскрытия как листового, так и фасонного проката, в частности, труб.

Традиционная декартова система для работы в 2-3 осях характерна для большинства известных устройств координатных перемещений мостового и консольного типов. Это относится, например, к разработанным и серийно выпускаемым на Государственном научно-производственном объединении «Центр» НАН Беларуси автоматизированным комплексам плазменной резки в воздушной среде (КПР-01), в водной среде (КПР-02) и комплексу для гидроабразивной резки КГР-01. Применение модульного прин-

ципа построения позволяет повысить универсальность и производительность этого оборудования за счет его оснащения дополнительно несколькими одновременно работающими обрабатывающими модулями, сверлильным модулем для механической обработки отверстий, перехода к пятикоординатной обработке для выполнения профильной резки, реза со скосом, снятия фасок, введением дополнительной угловой координаты для сообщения вращательного движения заготовке, например, при вырезке отверстий в трубах.

УДК 681.7:068

ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ УЧАСТКОВ И КРОМОК ДЕТАЛЕЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ИЗНОСУ

А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич

Брестский государственный технический университет

Работа посвящена созданию мощных плазмотронов постоянного тока для различных технологических процессов и проведения лабораторных занятий. С этой целью проведены широкие исследования электрической дуги, горящей в продольном потоке аргона. Разработана методика расчета плазмотронов постоянного тока в критериальной форме. Проведены исследования основных характеристик разработанного плазмотрона и поверхностного слоя упрочненных деталей.

Плазменные потоки используются в различных практических приложениях: для изучения движения тел при входе в плотные слои атмосферы Земли и других планет, для промышленного получения различных химических веществ, которые трудно либо вообще невозможно получить; при сварке, резке и упрочнении металлов, нанесении износостойких тонких пленок на детали машин, в металлургии, химической промышленности и многих других процессах [1, 2]. Одним из промышленных способов получения плазмы является применение плазмотронов постоянного тока, в которых горит электрическая дуга в потоке рабочего газа. С целью определения исходных данных для расчета и разработки плазмотронов проведены исследования напряженности электрического поля дуги, горящей в потоке аргона. Величины напряженности электрического поля E вдоль дуги определены методами изменения длины дуги и измерения потенциалов изолированных друг от друга секций разрядной камеры плазмотрона. Напряженность электрического поля дуги определялась по наклону кривой распределения потенциала вдоль оси z [3].

Установлено, что в исследованном диапазоне параметров, указанных в таблице, зависимость напряженности электрического поля от тока была линейно восходящей, а вдоль дуги величина E возрастает.

Таблица

Диапазон изменения параметров при исследовании дуги в аргоне

d , мм	10	20	30
a , мм	154	252	358
I , А	100 – 180	30 – 180	30 – 180
G , г/с	0,5 – 4	0,5 – 4	0,5 – 4

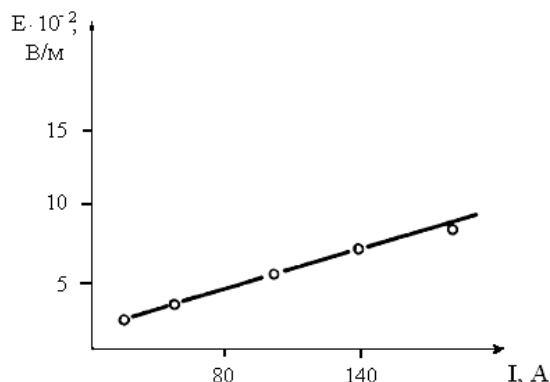


Рис. 1. Напряженность электрического поля дуги, горящей в потоке аргона при $d = 1$ см, $G = 4$ г/с

На рисунке 1 изображена типичная зависимость напряженности электрического поля аргоновой дуги от тока I .

На основе теории подобия разработана методика расчета плазмотронов. Учитывая особенности горения дуги в аргоне, обобщенную зависимость напряженности электрического поля E от определяющих критериев будем искать в виде:

$$E_H d = c \left(\frac{G}{d} \right)^{\beta} (pd)^{\gamma} \left(c_0 + c_1 \frac{I}{d} \right) \cdot f \left(\frac{z}{d} \right). \quad (1)$$

Экспериментальные данные обобщаются следующей критериальной формулой:

$$E_H d = 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{G}{d} \right)^{0,11} \left(135 + 10^{-2} \frac{I}{d} \right) \cdot \left(0,9 + 1,6 \cdot 10^{-4} \frac{z}{d} \right), \quad (2)$$

где G – расход аргона; d – диаметр разрядной камеры.

На основе разработанной методики с использованием критериальной формулы для E сконструирован и создан плазмотрон, который рекомендуется для проведения лабораторных занятий и промышленного использования [3]. Принципиальная схема плазмотрона, его электропитания и поджига приведена на рисунке 2.

Проведены исследования энергетических характеристик плазмотрона. Одновременно с исследованием вольт-амперных характеристик дуги проводились измерения тепловых потоков в элементы плазмотрона: катод, анод и поджигающий электрод. Это позволило вычислить тепловой КПД плазмотрона, энтальпию и среднемассовую температуру газа в зависимости от ве-

личины тока дуги и длины анода при различных расходах аргона. Установлено, что тепловой к.п.д. равен 0,68 – 0,74, а рассчитанная температура на выходе плазмотрона равна $T = 3700 - 7200$ К. Тепловые потери в катод почти не зависят от диаметра вольфрамового стержня.

Выполнен микроструктурный анализ сталей при термообработке образцов. На рисунке 3 показана микроструктура поверхностного слоя стали 45. Металлографический анализ упрочненной стали с использованием оптической и электронной микроскопии показал, что зона влияния плазменной струи имеет форму сегмента (рис. 3, а) и по своему строению аналогична зоне влияния при термообработке стали лазером и электронным лучом.

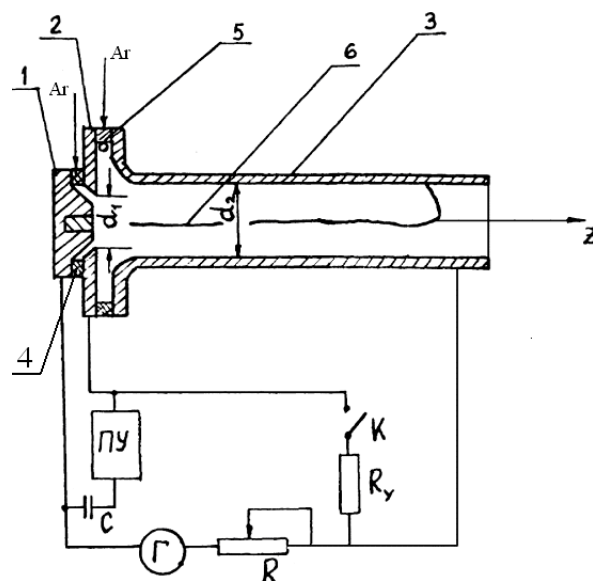
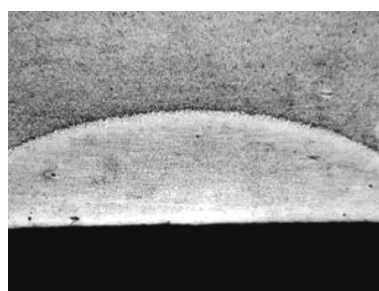
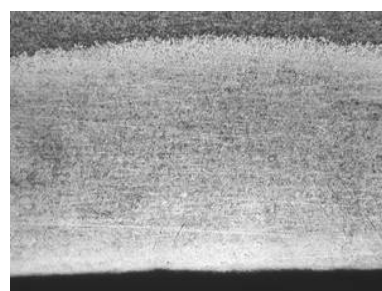


Рис. 2. Схема плазмотрона и электропитания: 1 – катод; 2 – поджигающий электрод; 3 – анод; 4 и 5 – изоляторы; 6 – дуга



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя стали 45: а) зона влияния плазменной струи; $\times 45$, б) микроструктура зоны нагрева; $\times 180$

Разработанный плазмотрон рекомендуется для различных технологических процессов плазменного упрочнения и проведения лабораторных занятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, М. Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М. Ф. Жуков, А. С. Коротеев, Б. А. Урюков. – Новосибирск : Наука СО АН, 1975. – 299 с.
2. Сазонов, М. И. Использование CVD-метода на установке ВПУ-2 для увеличения износостойкости твердосплавных пластин/ М. И. Сазонов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. научн. трудов Междунар. конф. – Новополюк, 2001. – С. 696 – 699.
3. Даутов, Г.Ю. Напряженность электрического поля в стабилизированной вихрем дуге / Г. Ю. Даутов, М. И. Сазонов // ПМТФ, 1967. – №4. – С. 127 – 131.

**РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ
РЕЖИМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИНДУКЦИОННОГО ПРИПЕКАНИЯ**

Ю. Н. Гафо, И. А. Сосновский, А. А. Курилёнок

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Разработана система контроля и регулирования температуры при центробежном индукционном припекании с использованием пирометрического контроля температуры наружной поверхности заготовки и регулирования мощности нагрева.

Автоматизация процесса индукционного центробежного припекания порошковых слоев к внутренней поверхности упрочняемых цилиндрических заготовок предусматривает использование автоматического регулирования и стабилизации режимов нагрева заготовок. Стабилизация режимов нагрева необходима в первую очередь для обеспечения стабильности повторяемости качества каждой из большого числа упрочняемых деталей. Использование автоматического регулирования процесса центробежного припекания позволяет, с одной стороны, осуществлять стабилизацию строго заданных режимов нагрева, а с другой, – практически полностью исключить трудозатраты, связанные с необходимостью ручного регулирования этих режимов в течение каждого цикла нанесения покрытия.

Методы регулирования температуры наружной поверхности вращающейся заготовки при ЦИП могут быть разделены на две основные группы:

- а) дискретное управление (включение-отключение источника нагрева в заданном интервале температур с помощью электрического реле);
- б) непрерывное управление (регулирование мощности нагрева на основании электрического сигнала, регистрируемого пирометром).

Второй метод представляется предпочтительным, поскольку при этом исключается нестабильность работы генератора ТВЧ, связанная с дискретным режимом его работы, что приводит к нестабильности термических режимов.

В качестве основных технических средств для автоматизации процесса центробежного припекания использованы серийно выпускаемый Каменец-Подольским приборостроительным заводом (Украина) прибор контроля измеряемой в процессе нагрева заготовок температуры (оптический пирометр излучения АПИР-С), а также нестандартная аппаратура (регулятор мощности генератора ТВЧ АРРИН-2М) для регулирования и стабили-

зации задаваемой температуры и схемы привязки к источнику нагрева и стыковки представленных выше приборов, разработанные Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь).

Постановка задачи разработки системы регулирования и стабилизации режимов нагрева на базе описанных выше измерительных и регулирующих приборов связана с необходимостью в процессе нанесения покрытия осуществлять непрерывный контроль и поддержание температуры нагрева заготовки на заданном уровне. Повышенные требования к точности задания температуры припекания ($T_{\text{прип.}} = 0,7 \dots 0,9 T_{\text{пл.}}$) и стабилизации ее на заданном уровне обусловлены тем, что применяемые для упрочнения деталей износостойкие хромо-никелевые сплавы типа ПГ-СР2; ПГ-СР3; ПГ-СР4 или на основе железа – ПР-Х4Г2Р4С2ФЮД очень чувствительные к перегреву, который существенно ухудшает их свойства после формирования из них покрытия.

Система автоматического регулирования режимов нагрева позволяет при заданных температурно-временных параметрах обеспечить стабилизацию процесса индукционного центробежного припекания для широкого диапазона типоразмеров упрочняемых деталей.

На рисунке 1 представлена структурная схема системы автоматического регулирования режима нагрева заготовок.

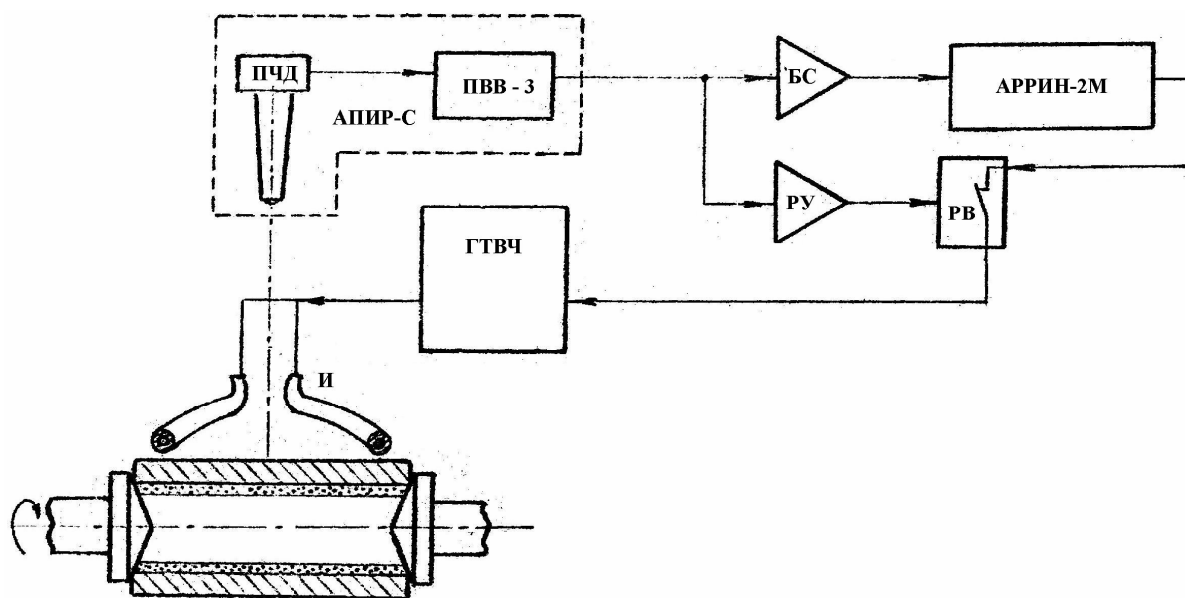


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования режима нагрева заготовок

Структурная схема содержит: ПЧД и ПВВ-3 – соответственно, первичный оптический преобразователь частичного излучения и преобразователь измерительный вторичный, которые образуют комплекс АПИР-С;

БС – блок согласования выходного сигнала вторичного преобразователя ПВВ-3 АПИР-С с входным сигналом АРРИН-2М; АРРИН-2М – регулятор мощности генератора ТВЧ; РУ – реле уровня выходного сигнала вторичного преобразователя АПИР-С; РВ – реле времени; ГТВЧ – генератор токов высокой частоты; И – индуктор.

Работа системы автоматического регулирования заключается в следующем. Нагрев упрочняемой заготовки производится после подачи от регулятора мощности АРРИН-2М на сетки тиратронов ГТВЧ управляющего напряжения, что вызывает протекание через индуктор *И* токов высокой частоты. Протекание тока в индукторе создает индуцирование его в заготовке и ее разогрев. В результате нагрева происходит изменение спектра волн светового излучения наружной поверхности заготовки, которое улавливается оптическим датчиком частичного излучения ПЧД, преобразующего интегральный световой поток в электрический сигнал. Электрический сигнал, соответствующий температуре нагретой заготовки, усиливается и линеаризуется вторичным измерительным преобразователем ПВВ-3, с выхода которого снимают напряжение от 0 до 10 В, пропорциональное изменению температуры от 600 до 1300°С. Выходное напряжение ПВВ-3 подается на вход АРРИН-2М через блок согласования БС.

Блок согласования БС представляет собой преобразователь выходного напряжения ПВВ-3 в изменяемое по линейному закону электрическое сопротивление, регулирующее входной ток АРРИН-2М пропорционально изменению измеряемой температуры.

Поступающий на вход АРРИН-2М через БС электрический сигнал усиливается и управляет работой выходного тиристорного ключа АРРИН-2М, регулирующего уровень управляющего напряжения тиратронов ГТВЧ.

Принцип регулирования подаваемой на нагреваемую заготовку мощности заключается в том, что при повышении температуры в диапазоне 600...1300°С выходное напряжение регулятора АРРИН-2М, а, следовательно, и подводимая к индуктору ГТВЧ мощность снижается.

Продолжительность изотермической выдержки устанавливается с помощью реле времени РВ, управляемого реле уровня РУ выходного сигнала ПВВ-3 АПИР-С.

В результате анализа технологических особенностей процесса индукционного центробежного припекания порошковых покрытий, на внутреннюю поверхность полых цилиндрических заготовок при нагреве наружным индуктором тока высокой частоты показано, что наиболее рациональным является поддержание заданной температуры спекания порошка путем пиromетрического контроля температуры наружной поверхности заготовки и регулирования мощности нагрева. Разработана система контроля и регулирования температуры при центробежном индукционном припекании.

**ФОТОБАРЬЕРЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ
ПО ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

В. В. Ткаченко, В. В. Шуляк, С. Л. Канделинский, О. О. Кузнечик
*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск*

Приведены алгоритм работы, структурная и функциональная схемы, а также технические характеристики фотобарьеров для систем управления промышленным оборудованием по обработке металлов давлением.

В машиностроении широко применяется промышленное оборудование по обработке металлов давлением. Рабочим органом такого оборудования является штамповый или прессовый инструмент, который во время своей работы может создавать обслуживающему персоналу травмоопасные производственные зоны. Для снижения травмоопасности в этих зонах в системах управления промышленным оборудованием по обработке металлов давлением используются различные устройства, способные останавливать работу штампового или прессового инструмента в критических для обслуживающего персонала ситуациях. Повышение эффективности применения таких устройств в системах управления промышленным оборудованием по обработке металлов давлением является актуальной задачей, решить которую можно с помощью фотобарьеров. Известно, что основными конструктивными элементами таких устройств (рис. 1) являются оптический излучатель 1, фотоприемник 2, блок управления 3, устройство оповещения и реле, а также электронное (электромеханическое или магнитное) реле 5, включаемое в электрическую цепь управления приводом штампового или прессового инструмента промышленного оборудования по обработке металлов давлением.

Благодаря таким конструктивным элементам (рис. 1), как оптический излучатель 1 и фотоприемник 2, фотобарьер способен создавать световую завесу, перекрывающую травмоопасную производственную зону. При пересечении световой завесы непрозрачным телом из-за регистрируемого фотоприемником 2 прерывания светового потока оптического излучателя 1 блок управления 3 с помощью реле 5 может размыкать цепь управления приводом штампового или прессового инструмента, вызывая тем самым блокировку его работы. Вместе с реле 5 срабатывает и оповещатель 4. В зависимости от конструктивного исполнения, это устройство может гене-

рировать соответствующие звуковые, световые или электрические сигналы. На достоверность блокировки фотобарьером работы штампового или прессового инструмента оказывает влияние случайные источники засветки, которые могут генерировать из неизвестного местоположения световые потоки непрерывного, периодического, аperiodического или импульсного действия. Следует также обратить внимание на то, что причинами случайной засветки могут являться отражающие поверхности, появляющиеся случайным образом. Учитывая это, для повышения достоверности блокировки работы штампового или прессового инструмента промышленного оборудования по обработке металлов давлением, предложено использовать в блоке управления 3 фотобарьера следующее:

- микропроцессорную систему с функциональной схемой, приведенной на рис. 2;
- программно устанавливаемый транспарант, который способен прерывать прием фотоприемником 2 (рис. 1) светового потока оптических кодово-импульсных посылок, генерируемых оптическим излучателем 1.

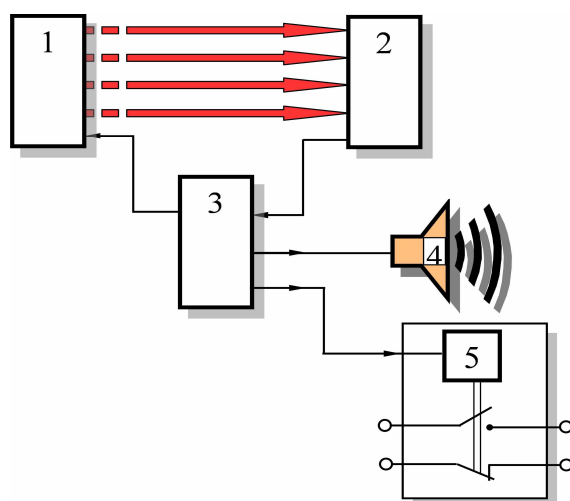


Рис. 1. Структурная схема фотобарьера:
1) оптический излучатель; 2) фотоприемник; 3) блок управления;
4) оповещатель; 5) реле

Блок управления 3 (рис. 1), содержащий микропроцессорную систему, реализованную согласно функциональной схеме, приведенной на рис. 2, за счет микропроцессора 1, запоминающего устройства 2, генератора излучения 3, счетчика импульсов 4, формирователей выходных и входных импульсов 6, 7 на программном уровне позволяет выполнить следующие процедуры:

- обеспечить передачу и прием оптических кодово-импульсных посылок;

– проводить анализ результатов процесса передачи и приема кодово-импульсных посылок и на его осуществлять принятие решения о включении оповещателя 4 и реле 5 (рис. 1) фотобарьера (последнее достигается с помощью приведенного на рисунке 2 включателя 5 и поддерживается с помощью триггера 8).

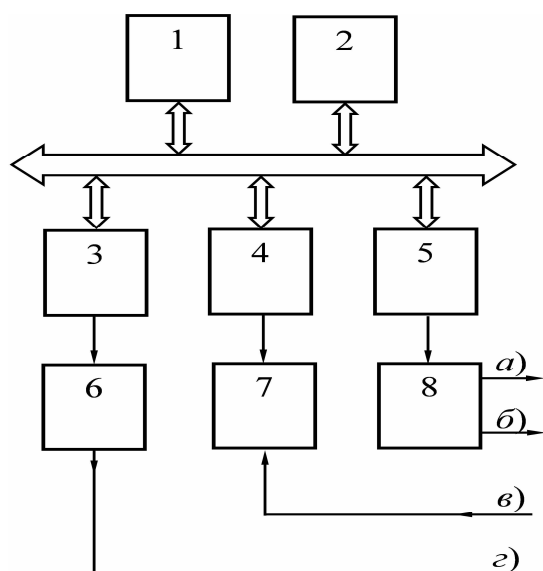


Рис. 2. Функциональная схема блока управления:

1 – микропроцессор; 2 – запоминающее устройство; 3 – генератор излучения; 4 – счетчик импульсов; 5 – включатель оповещателя и реле; 6, 7 – формирователи выходных и выходных импульсов соответственно; 8 – триггер состояний

Фотобарьеры, реализующие в своей конструкции структурную (рис. 1) и функциональную (рис. 2) схемы, изготавливаются в ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» (ОИПИ) НАН Беларуси. Их технические характеристики приведены в таблице.

Таблица

Технические характеристики фотобарьеров

Наименование характеристики	Значение
Количество каналов	1 – 40
Минимально допустимый шаг между каналами	20 мм
Тип излучения	кодowo-импульсный
Используемая длина волны оптического излучателя	1,06 мкм
Угол излучения	не более 15 ⁰
Дальность действия световой завесы	до 100 м
Минимальное время срабатывания	не более 40 мс
Максимально допустимый ток при разрыве коммутации	до 10 А
Класс защиты соответствует стандарту	IEC 61496
Однофазное сетевое напряжение переменного тока	~110 – 250 В
Частота переменного тока в сети	50 – 60 Гц

Фотобарьеры ОИПИ НАН Беларуси используются в системах управления технологическим оборудованием для обработки металлов давления на таких предприятиях Беларуси, как ОАО «МАЗ» и ОАО «БААЗ».

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ СТОЙКИ КОНСОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА

Д. В. Омель, В. П. Горбунов

Брестский государственный технический университет

Тепловые процессы, происходящие в элементах станка, снижают их геометрическую точность, носят нестационарный характер и трудны в определении. Чтобы компенсировать смещение взаимного положения инструмента и заготовки в результате тепловых деформаций базовых элементов станка необходимо прогнозировать их величину при его работе. Моделирование термоупругих процессов с помощью ЭВМ позволяет определить нестационарное тепловое поле несущей системы станка, а также величину смещения инструмента в любой момент времени.

Большую группу обрабатываемых деталей в машиностроении составляют корпусные детали. Обработка таких деталей осуществляется преимущественно на прецизионных многоцелевых станках с ЧПУ. Это связано с высокими требованиями, предъявляемыми к точности получаемых поверхностей деталей, а также к процессу обработки.

Повышенная энергоемкость многоцелевых станков с ЧПУ обуславливает значительные величины тепловых деформаций в этих станках, которые могут достигать 0,1 мм и выше через 3 – 4 часа после начала работы станка. Тепловые деформации элементов несущей системы станка приводят к отклонению взаимного положения инструмента и заготовки, в результате чего увеличиваются погрешности формы и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей. Термоупругие процессы, происходящие в оборудовании, носят нестационарный характер.

Наиболее чувствительными к неравномерному температурному полю являются станки с вертикальной компоновкой стойки и горизонтальный шпинделем, расположенным внутри нее. При тепловой деформации стойки происходит линейное и угловое смещение оси шпинделя. Для прогнозирования величины смещения оси шпинделя необходимо определить изменение теплового поля стойки во времени, а также связанные с ним тепловые деформации. Такую задачу можно решить с помощью моделирования термоупругих процессов на ЭВМ

Моделирование термоупругих процессов включает следующие основные этапы [1]:

- 1) анализ конструкции узлов и деталей станка;
- 2) выявление источников и стоков теплоты, их месторасположения; условий теплообмена деталей;

3) расчет мощности источников тепловыделения, величины и направления тепловых потоков, коэффициентов конвективного теплообмена с окружающей средой;

4) создание тепловой модели базовой детали станка – стойки – на основе математической модели, записанной в виде граничных условий, отражающих связи детали с точки зрения их теплового обмена;

5) определение нестационарного теплового поля стойки;

6) определение тепловых деформаций стойки для любого момента времени.

Мощность тепловыделения в подшипниках качения и зубчатых передачах была определена по методике, изложенной в [2]. Расчет показал, что основными источниками теплоты при работе исследуемого консольно-фрезерного станка являются подшипниковые опоры валов коробки скоростей и шпинделя.

Чтобы сформировать тепловую модель стойки необходимо определить величины и направления тепловых потоков, т.е. распределение выделившейся тепловой энергии между деталями станка. Данная задача решается на основе теории теплопроводности [3].

На рисунке 1 показана схема распределения тепловых потоков в передней подшипниковой опоре шпинделя.

Баланс теплоты в интересующей нас системе тел имеет вид

$$W = W_1 + W_2 + W_c, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где W – мощность источника тепловыделения, Вт;

W_1 , W_2 , W_c – мощности тепловых потоков, которые поступают соответственно в вал, корпус и смазочную жидкость, Вт.

Расчеты показали, что большая часть тепла (около 66%), выделяющегося в подшипнике, поступает в стойку станка.

Определение нестационарного теплового поля и тепловых деформаций стойки консольно-

фрезерного станка осуществлялось в среде конечно-элементного модуля CosmosWorks. На рисунке 2 представлена модель стойки в деформированном состоянии через 4 часа после начала работы станка.

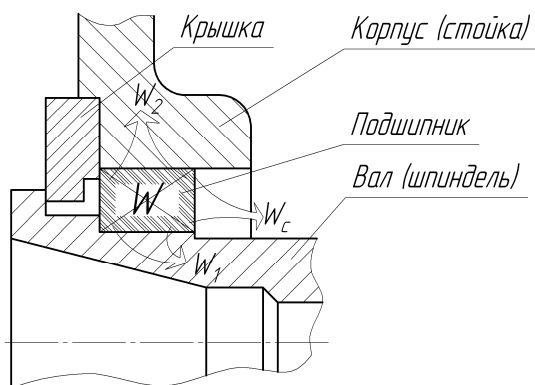


Рис. 1. Схема распределения тепловых потоков в подшипниковой опоре шпинделя

Полученные при моделировании градиенты распределения температур показали, что нагрев передней стенки стойки происходит более интенсивно, самым мощным источником тепловыделения является передняя опора шпинделя. Уже через час поле начала работы температура поверхности стойки у передней опоры достигает 26,4°C, при наступлении теплового баланса – 29,9°C.

Максимальное линейное смещение передней опоры при стабилизации тепловых деформаций составило $\Delta Y_{max} = 28,1$ мкм. Смещение опор шпинделя вдоль оси X отсутствует, т.к. стойка обладает тепловой симметрией относительно плоскости YOZ , совпадающей с геометрической плоскостью симметрии, проходящей через центры отверстий опор шпинделя.



Рис. 2. Деформированная модель стойки

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов, В. П. Анализ тепловых деформаций стойки многоцелевого станка с числовым программным управлением / В. П. Горбунов, Д. В. Омесь // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2010. – №4(64): Машиностроение. – С. 36 – 39.
2. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник. В 3-х т. Т. I: Проектирование станков / А. С. Проников, О. И. Аверьянов, Ю. С. Аполлонов; под общ. ред. А. С. Проникова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1994. – 444 с.
3. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.

УДК 616 616.3:612.12-005:615.22:616.379-008.64

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОДИНАМИКИ ОПОРНОГО АППАРАТА

В. М. Завальнюк, А. Г. Капсаров, В. Н. Шумилов

Белорусский государственный технологический университет, Минск

В пределах математического моделирования микросмещений опорного аппарата скелетных мышц рассмотрены микроколебания опорного аппарата. Показано, что в регионе капилляр, артериола – капиллярная

сеть – венула, микровибрации препятствуют развитию сладжа (расслоения) кровотока, что по состоянию кровотока позволяет количественно дозировать физическую нагрузку при ходьбе и ручной работе.

Исследования микрокапиллярных течений в регионе артериола – капиллярная сеть показали, что стресс, травма и малоподвижность могут быть ответственны за возникновение феномена «сладжа» («sludge – тина, ил) – расслоения кровотока [1]. В этой связи, очевидна необходимость слияния методов традиционной медицины, сложившейся в условиях массового применения ручного труда, и научной медицины. Возрастает и становится ядром двигательной профилактики здравосозидание по Н. И. Аринчину – учение, органично сочетающееся, как с феноменом разгрузочно-диетической терапии (РДТ), так и с многовековыми традициями массового оздоровления при творении поста и «чистого поста» [1 – 3].

Однако, проведенные Н. И. Аринчиным исследования внутримышечного периферического сердца на скелетных мышцах, предполагали динамическую инертность костной ткани опорного механизма [3].

Целью настоящей статьи является расширение модельных представлений динамики жёстких трубчатых элементов на *наноразмерные собственные* колебания жестких элементов опорного аппарата, влияющих на микроциркуляцию кровотока.

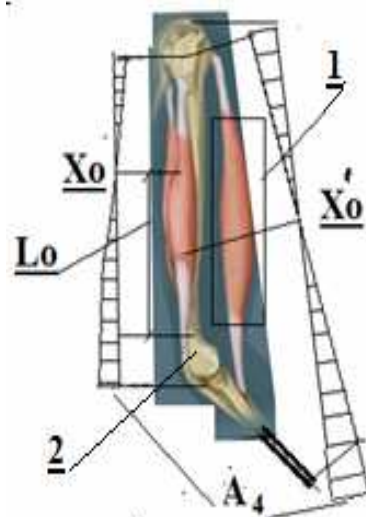
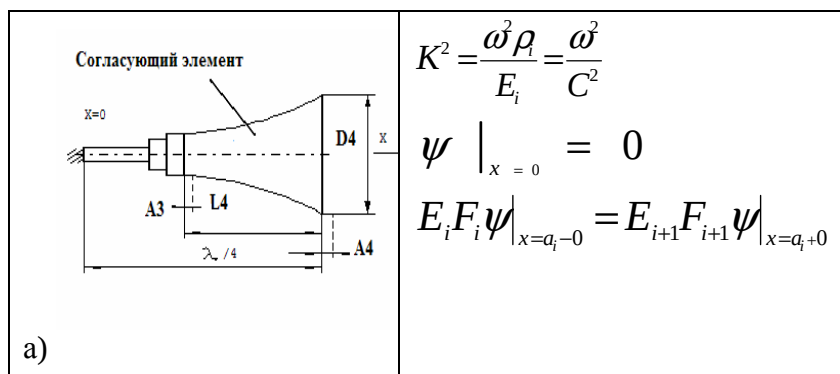
Возбуждение малых амплитуд резонансных колебаний твёрдых тел ручным натиранием известно уже более 200 лет из работ Релея и Хладни. Это позволило применить известное уравнение (1) для половины (полуволны) продольно колеблющегося стержня с гладким оголовком (рис. 1), в качестве аналога трубчатой кости плотностью ρ (12000 Н/м³), скоростью звука в ней – C (1,5 – 2000 м/с), модулем Юнга E (2×10^{10} н/м²) и площадью поперечного сечения F (5 – 100) 10^{-6} м²:

$$\rho_i F_i \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_i F_i \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где t и u – время и смещение в текущем сечении образца площадью F_i , закреплённого в X_0 («заделке» стержня).

После преобразований [4, 5] для условий, приведенных на рисунке 1, нами получено уравнение (2):

$$L_1 = \left(\frac{4A_4}{nd_3^2 \frac{l_4}{2P}} - 2A_3 \operatorname{tg} K_4 l_4 \right) \frac{1}{\Omega(1 - \operatorname{tg} K_4 l_4)}, \quad (2)$$



Согласно (2): Ω – константа; при A_3 и $A_4 \rightarrow 0$, для прямолинейного участка от X_0 , по формуле (2), L_1 монотонно $\rightarrow 0$ при частоте ω (200 – 2000 Гц).

б)

Рис. 1. а) схема расчёта и граничные условия модели полуволны; б) физическая модель:
1 – участок 1, L_0 , соответственно, мышечное волокно и участок малого диаметра;
2 – суставное расширение, участок L_4

Упругие микродеформации в диапазоне мощности человека (0, 01 – 3 кВт) на собственной частоте 100 – 1000 Гц при амплитуде порядка $A_4 = 2 \cdot 10^{-6}$ м колеблющейся (до 400 и более Гц мышцы, с усилиями до $1,5 \cdot 10^4$ Н) [3], и от цикла низкочастотной накачки от реакции опоры. Специфика же высокочастотного микродеформирующего воздействия на кровоток через внешнюю границу капилляра (венулы), связана с периодическим микроизменением профиля и радиуса капилляра R . Это явление удовлетворяет эффекту Сегре – Сильберберга [8, 9] в том, что при установившемся течении в канале, эритроциты мигрируют от *колеблющейся в нашем случае* стенки с максимумом концентрации между осью и стенкой канала. При этом вязкость крови становится функционалом от среднего радиуса струи кровотока R , градиента давления P и объёмного расхода Q , изученного Н. И Аринчиным.

Показано, что микроколебания опорного аппарата способствуют микроциркуляции компонентов крови в регионе капилляр, артериола – капиллярная сеть – вена, что принципиально позволяет количественно дозировать физическую нагрузку на опорные поверхности суставов и связок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саногенез (О науке и практике врачевания) / под ред. А. Н. Кокосова. – СПб. : ЭЛ-БИ-СПБ, 2009.
2. Уголев, А. М. Теория адекватного питания и трофология / А. М. Уголев. – Л. : Наука, 1991. – 272 с.

3. Аринчин, Н. И. Внутримышечное периферическое сердце / Н. И. Аринчин, Г. Д. Недвецкая. – Минск : Наука и техника, 1974.
4. Dovgyallo, I. Criteria of fatigue strength of materials in complex stress states in asymmetrical cycles of stress in a wide range of frequencies / I. Dovgyallo, S. Makarevich, A. Kapsarov // Greep and Complied Processes Publishers Bial Tech Univ. – 1996. – P. 147 – 152.
5. Dovgyallo, I. The influence of frequency of longitudinal vibrations on fatigue characteristics of 10 and 40X steels at hydraulic loading / I. Dovgyallo, S. Makarevich, A. Kapsarov // Greep and Coupled Processes, IV th international symposium, Bialystok, Poland, September 24 – 26, 1992. – P. 53 – 56.
6. Segre, O. Radial particle displacements in Poiseuille flow / O. Segre, A. Silberberg. – Nature, 1961. – P. 209 – 210.
7. Segre, O. Behaviour of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow / O. Segre, A. Silberberg. – J. Fluid Mech., 1962. – V. 14. – N 1. – P. 115 – 135.

УДК 681.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКОЙ

О. О. Кузнечик, В. В. Ткаченко, В. В. Шуляк, С. Л. Канделинский
*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск*

Приведены функциональные схемы ПИД-регуляторов и систем адаптивного управления, которые могут быть использовать в процессах порошковой электроконтактной наплавки для стабилизации технологических режимов.

Пропорциональные интегрально-дифференциальные регуляторы (в дальнейшем – ПИД-регуляторы) используются в цепи обратной связи систем автоматического управления для формирования управляющего сигнала. Формирование такого управляющего сигнала происходит с учетом суммирования трёх слагаемых (рис. 1), первое из которых пропорционально входному сигналу, второе – является интегральной, а третье – производной составляющими от этого входного сигнала.

Согласно функциональной схеме на рисунке 1, выходной сигнал $u(t)$ для аналоговых ПИД-регуляторов будет определяться сложением трех детерминированных слагаемыми:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) + d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (1)$$

а для цифровых (микропроцессорных) ПИД-регуляторов – сложением трех дискретных слагаемых

$$U(n) = K_n E(n) + K_p K_{ip} T \sum_{k=0}^n E(k) + \frac{K_p K_{dp}}{T} (E(n) - E(n-1)) , \quad (2)$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной слагаемых, соответственно; $E(n) = x_0 - x_i$, $E(k) = x_0 - x_m$.

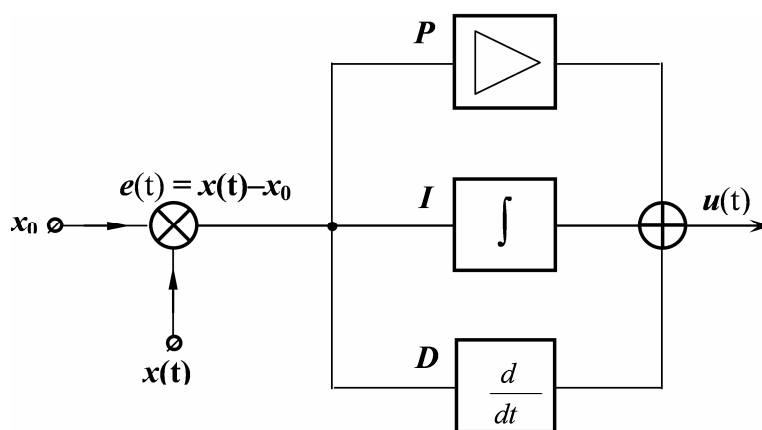


Рис. 1. Функциональная схема ПИД-регулятора:
 x_0 – задаваемое значение уставки; $x(t)$ – текущее значение уставки;
 $e(t)$ – рассогласование; P , I , D – пропорциональная, интегральная
и дифференциальная составляющие

Использование ПИД-регуляторов в системах адаптивного управления (САУ), реализующих приведенную на рисунке 2 функциональную схему, позволяют осуществлять стабилизацию технологических режим. Благодаря этому, использование ПИД-регулятора в системах управления машин контактной сварки может повысить эффективность порошковой электроконтактной наплавки за счет стабилизации технологических режимов этого процесса.

Реализовать САУ порошковой электроконтактной наплавки на основе машин контактной сварки можно, если использовать ПИД-регуляторы, содержащие электронные модули, которые состоят из таких конструктивных элементов, как многоканальные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, триггеры состояний (электронные реле), микропроцессорные контроллеры внешних устройств. В частности, если использовать процессы порошковой электроконтактной наплавки длительностью, превышающей пять – десять секунд, то для стабилизации температурного режима могут использоваться ПИД-регуляторы типа ТРМ ООО «Овен».

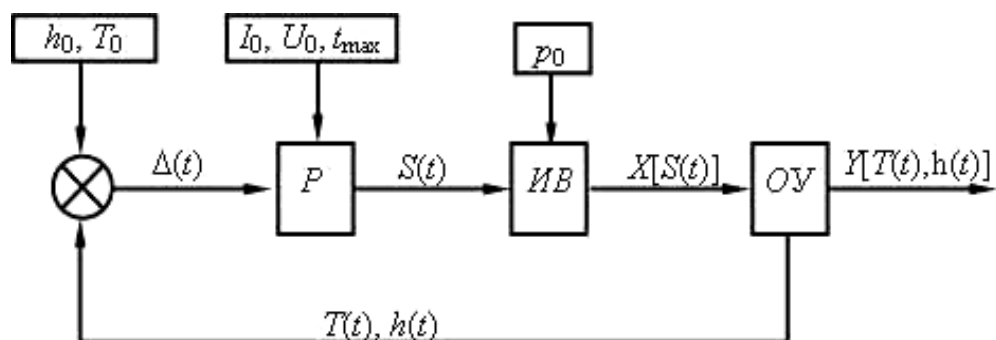


Рис. 2. Функциональная схема САУ порошковой электроконтактной наплавки: P – ПИД-регулятор; $ИБ$ – источник воздействия (машина контактной сварки); $ОУ$ – объект управления (порошок); h_0, T_0, I_0, U_0, p_0 – уставки толщины покрытия; температуры наплавки, напряжения и силы тока, усилия сжатия электродов соответственно

УДК 621.762.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ И ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВТУЛОК БУРОВЫХ НАСОСОВ

С. В. Побережный, А. А. Стефанович, О. О. Кузнечик

Институт порошковой металлургии, Минск

О. А. Филиппов

Интеком-Промсервис, Санкт-Петербург

Приведен сравнительный анализ перспектив применения технологий индукционно-центробежной, химико-термической и импульсно-плазменной обработки рабочих поверхностей в производстве втулок буровых насосов. Предложено при среднесерийном и крупносерийном производстве втулок буровых насосов с целью повышения их коррозионной стойкости и износостойкости использовать химико-термическую и импульсно-плазменную обработку, основанную на термодиффузионных процессах карбохромирования.

Повышение эффективности производства втулок буровых насосов является актуальной задачей машиностроения, которая в настоящий момент, в основном, решается методом индукционной центробежной наплавки. Буровые насосы, как правило, используются либо для подачи промысловой жидкости (плотностью до $1\,200 - 1\,300\text{ кг/м}^3$) на забой при бурении скважин, либо для подачи бурового раствора (плотностью до $2\,500 - 3\,000\text{ кг/м}^3$) на забой при строительстве разведочных и эксплуатационных скважин. Учитывая, что промысловые или буровые растворы являются сложными многокомпонентными дисперсными системами суспензионных, эмульсионных и аэрированных жидкостей, в том числе содержащие твер-

дофазные включения, поэтому основными факторами выхода из строя втулок буровых насосов являются абразивный износ и коррозия их внутренних рабочих поверхностей на глубину до 2 мм. Для повышения долговечности работы этих поверхностей при индукционной центробежной наплавке, как правило, используются серые чугуны с ферритно-перлитной металлической основой, легированной хромом (для повышения коррозионной стойкости) и молибденом (для повышения износостойкости). Покрытия наносятся на внутренние поверхности цилиндрических заготовок, изготовленные из низкоуглеродистых марок сталей рекомендованных к сварке. Толщина таких покрытий с учетом износа может достигать 2 – 3 мм, что позволяет называть полученные с использованием метода индукционной центробежной наплавки стальные втулки буровых насосов биметаллическими.

Достоинствами индукционной центробежной наплавки является то, что она может производиться с использованием порошковой шихты при температурах плавления (для серого чугуна это 1 150 – 1 260 °С), которые ниже температур заливки в литейные формы (для серого чугуна 1 280 – 1 400 °С). Благодаря центробежным силам выделяемый из порошковой шихты расплавленный чугун вдавливается и растекается по внутренней поверхности стальной цилиндрической заготовки втулки, формируя при этом относительно равномерную структуру. Однако следует отметить, что кроме чугуна и легирующих металлов, в шихте также содержатся флюсы, создающие при нагреве окислительно-восстановительную защитную атмосферу, которая вместе с инородными по отношению к плавящемуся чугуну включениями, которые легче основного металла, также оттесняются центробежной силой к внутренней поверхности цилиндрической заготовки втулки. Это приводит к тому, что получаемые индукционной центробежной наплавкой покрытия содержат остаточную пористость, которая ограничивает не только их прочность, но и прочность сцепления с основой, включая коррозионную стойкость и износостойкость. Для придания наплавляемым таким образом покрытиям необходимой прочности и твердости, влияющей на износостойкость, а также коррозионной стойкости, после наплавки необходимо при температурах 850 – 950 °С проводить нормализацию, при которой добиваются насыщения аустенита углеродом, с последующей закалкой при температурах 850 – 930 °С чугуна на мартенсит и охлаждением в воде и масле с последующей низкотемпературным отпуском (200 °С) для уменьшения закалочных напряжений или высокотемпературным отпуском (600 – 700 °С) для получения микроструктур сорбита или зернистого перлита, обеспечивающих повышенную вязкость. После вышеуказанной термообработки, имеющих твердость 61 – 65 HRC поверхности внутренних покрытий втулок буровых насосов с помощью механической обработки (точения на глубину до 0,5 – 1 мм, шлифовки и полировки) рекомендуется

довести до зеркального состояния. При этом у получаемых покрытий адгезионная прочность не будет превышать (а при наличии характерных для наплавки дефектов будет заведомо ниже) прочность сцепления слоев низкоуглеродистой стали, из которой изготовлены цилиндрические заготовки втулок бурового насоса. Остаточная пористость, включая характерные для индукционной центробежной наплавки дефекты, дополнительная химико-термическая обработка, повторная механическая обработка поверхностей высокой твердости, ограничивают эффективность применения индукционной центробежной наплавки в производстве втулок буровых насосов. При этом остаточная пористость и характерные для индукционной центробежной наплавки дефекты, также ограничивают возможность повышения коррозионной стойкости и износостойкости рабочих поверхностей втулок буровых насосов. Кроме этого, из-за природы возникновения характерных для индукционной центробежной наплавки дефектов, выбор материалов для изготовления цилиндрических заготовок втулок буровых насосов является ограниченным. Так, например, использование низкоуглеродистой стали в качестве рассматриваемого материала, не обладает коррозионной стойкостью, что отрицательно влияет на выпрессовку втулки из насоса при замене.

Производство втулок буровых насосов можно осуществлять с использованием химико-термической обработки. Этот метод позволяет расширить номенклатуру марок сталей, используемых в качестве материала для изготовления цилиндрических заготовок втулок. В частности, можно использовать не только низкоуглеродистые, но и низкоуглеродистые легированные более устойчивые к коррозии марки стали. Само изготовление цилиндрических заготовок может осуществляться с помощью механической обработки, включающей в себя точение и шлифовку. В отличие от индукционной центробежной наплавки операция шлифовки в этом случае производится в условиях, когда твердость обрабатываемого материала минимальна. При этом повторная операция точения, проводимая после индукционной центробежной наплавки с целью подгонки биметаллических покрытий в размер, не производится. Обеспечить необходимую коррозионную стойкость, износостойкость и долговечность рабочих поверхностей втулок буровых насосов можно, если с помощью химико-термической обработки, проводимой при температурах 950 – 1050 °С, осуществлять карбохроммирование на глубину 2 – 3 мм. В этом случае прочность сцепления получаемых поверхностных слоев будет выше, чем адгезионная прочность биметаллических втулок, получаемых индукционной центробежной наплавкой. Сократить длительность процесса химико-термической обработки можно за счет дополнительной импульсно-плазменной обработки, повышающей скорость термодиффузионных процессов. Принимая во внимание загрузочную способность печного оборудования, загрузочную способ-

ность индукционных машин, производительность импульсно-плазменных установок, на среднесерийном и крупносерийном производстве втулок буровых насосов, используя химико-термическую и импульсно-плазменную обработку, можно добиться сопоставимых с индукционной центробежной наплавкой энергозатрат. Принимая во внимание затраты на механическую заготовку, можно сделать следующий вывод.

Внедрение технологии химико-термической и импульсно-плазменной обработки рабочих поверхностей втулок буровых насосов в среднесерийное и крупносерийное производство может способствовать повышению эффективности этого производства, а изготавливаемые на нем изделия могут обладать повышенной коррозионной стойкостью и износостойкостью.

УДК 621.922.546

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ АЛМАЗОВ

А. С. Аршиков, А. А. Лысов

Полоцкий государственный университет, Новополоцк,

Ю. Н. Гафо

Объединенный институт машиностроения, Минск

Разработана технология получения композиционного алмазосодержащего инструментального материала, обеспечивающая высокие эксплуатационные показатели алмазного инструмента. Спроектировано и изготовлено опытно-промышленное оборудование и технологическая оснастка. Результаты работы прошли промышленную апробацию и внедрены в производство.

Область применения разработки – алмазный инструмент для обработки твердых металлических и неметаллических материалов.

Режущая способность, эксплуатационные характеристики композиционных алмазосодержащих инструментальных материалов во многом определяются количеством, т. е. концентрацией, алмазных режущих зерен в его объеме.

Одним из перспективных направлений получения алмазосодержащих материалов с высокой концентрацией алмазных частиц является предварительное формование алмазных порошков с дальнейшей их пропиткой связующими. Среди различных методов компактирования алмазных частиц весьма эффективными являются методы, в которых алмазный слой формируется под действием центробежных сил, возникающих в процессе

вращения цилиндрической формы-изложницы вокруг своей оси, а алмазный порошок предварительно помещается в полость формы.

При реализации центробежного способа формирования алмазосодержащего порошкового слоя происходит одновременно по всей поверхности цилиндрической формы-изложницы с последующей пропиткой расплавом металла-связки, что обуславливает высокую производительность центробежного способа. При этом получение алмазосодержащего материала путем центробежного формования и пропитки позволяет за счет сохранения исходных режущих свойств алмазного порошка и высокой концентрации алмазов в объеме обеспечить высокие эксплуатационные свойства композиционного инструментального материала.

Однако алмазные порошки, обладая низкой сыпучестью, склонны к образованию агломератов, «куполов» и «арок», что, в свою очередь, приводит к неравномерности распределения алмазосодержащего слоя на внутренней поверхности формы-изложницы, обуславливает его неравномерную толщину и плотность.

Предложен способ и технология [1], предполагающие дополнительное использование импульсного силового воздействия в виде периодического изменения скорости вращения формы-изложницы в процессе формования алмазосодержащих порошковых слоев и последующей пропитки расплавом металла-связки. Дополнительное движение формы осуществлялось в виде крутильных либо осевых колебаний в зависимости от вида, параметров изделия и схемы процесса. После формирования порошкового слоя на внутренней поверхности формы-изложницы производится операция заливки определенной дозы расплава металлической связки [2]. На рисунке 1 представлена топография поверхности алмазосодержащего материала, полученного с применением импульсного силового воздействия, которая свидетельствует об эффективности предложенного технологического приема, т. е. об очевидном повышении концентрации активных режущих зерен (рис. 1, б).

Наилучшими физико-механическими и эксплуатационными свойствами обладают материалы, сформованные при следующих значениях технологических параметров: вращение формы-изложницы вокруг своей оси с угловой скоростью $\omega = 18...25 \text{ с}^{-1}$; частота угловых колебаний $W = 40...60 \text{ Гц}$; интенсивность изменения скорости вращения $\lambda = 3,5...6,0$. С учетом этих режимов, а также результатов исследований условий формирования и кинетики уплотнения порошковых слоев в поле совместного действия центробежных сил и импульсного силового воздействия был разработан технологический процесс и оборудование для получения композиционных алмазосодержащих материалов инструментального назначения методом активированной пропитки в центробежном поле [3].

Технологический процесс состоит из формования «холодного» слоя алмазного порошка, пропитки расплавом с импульсным силовым активированием и последующей механической обработкой изделия. Во внутреннюю полость цилиндрической формы-изложницы устанавливается пористый вкладыш, что обеспечивает сквозную пористость и равномерную эффективную пропитку сформированного слоя, и засыпается объемная доза алмазного порошка. Затем форме задается вращение вокруг собственной оси и крутильные колебания с помощью специального устройства. При этом происходит равномерное формование и уплотнение слоя за счет оптимальной укладки частиц алмаза под интегральным действием силовой импульсной активации и центробежного давления. Нагрев формы производится токами высокой частоты на установке ВЧГУ-60/0,4. При достижении формой-изложницей температуры 400...500 °С производится заливка расплава металла-связки с одновременным импульсным активированием.

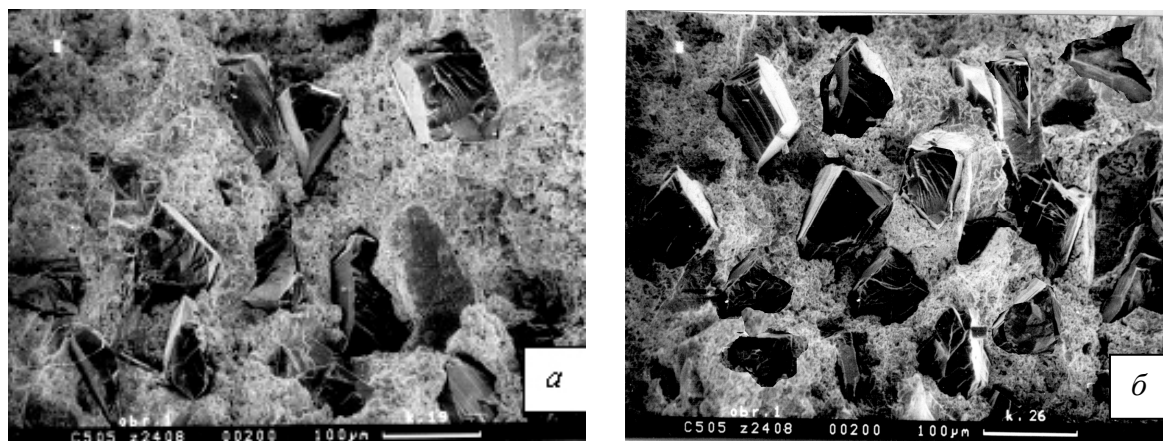


Рис. 1. Топография поверхности алмазосодержащего материала:
а – без импульсного воздействия; *б* – импульсным воздействием.

Квалификационные и эксплуатационные испытания алмазного инструмента типа планетарный диск, оснащенного изготовленными по разработанной технологии режущими элементами, при обработке уплотнительных твердосплавных поверхностей запорной нефтехимической арматуры ОАО «НАФТАН» показали высокую режущую способность (в 1,7 раза) и износостойкость (в 1,5 раза) по сравнению с традиционными алмазно-абразивными инструментальными материалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ изготовления шлифовального инструмента : пат. 7042 Респ. Беларусь, МПК В24 D3/06, С1 2005.06.30 / А. С. Аршиков, А. А. Лысов. – № а 200109011; заявл. (22)31.10.01; опубл. 25.06.05 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. камітэт Рэсп. Беларусь. – 2005. – № 2 (45). – С. 132–134.

2. Лысов, А. А. Технология получения алмазного инструмента для обработки слоистых пластиков и стеклопластиков / А. А. Лысов, А. С. Аршиков, И. Н. Куксинский // Композиционные материалы в промышленности (СЛАВПОЛИКОМ-98) : материалы Междунар. конф., пос. Славское, 3–5 марта 1998. – Ч. 1. – С. 35–37.
3. Устройство для изготовления абразивного инструмента : пат. 635 Респ. Беларусь, МПК В24 D 3/10 / А. С. Аршиков, А. А. Лысов, М. Е. Кузнецов. – № U 20010300; заявл. 18.12.01; опубл. 30.09.02 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. камітэт Рэсп. Беларусь. – 2002. – № 3 – С. 211–212.

УДК 656

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

В. Н. Седюкевич, Д. В. Капский

Белорусский национальный технический университет, Минск

Определены дисциплины и их объем, по которым подготавливают специалистов транспортного профиля. Обоснована переподготовка работников со средним техническим образованием.

Рост автомобильного парка предъявляет определенные требования к подготовке специалистов соответствующего профиля, которые квалифицированно подходят к решению задач, направленных на повышение эффективности автомобильных перевозок и повышение безопасности дорожного движения.

Подготовка специалистов по организации и выполнению автомобильных перевозок осуществляется в рамках специальности 1-44 01 01 «Организация перевозок и управление на автомобильном и городском транспорте».

Форма обучения – *дневная и заочная*. Квалификация – *инженер-менеджер*. По специальности 1-44 01 01 предусмотрены специализации:

- 1-44 01 01 01 «Грузовые автомобильные перевозки»;
- 1-44 01 01 02 «Перевозки пассажиров автомобильным и городским транспортом»;
- 1-44 01 01 03 «Международные автомобильные перевозки»;
- 1-44 01 01 04 «Перевозки опасных грузов автомобильным транспортом»;
- 1-44 01 01 05 «Транспортно-экспедиционная деятельность».

Ведется подготовка магистрантов и аспирантов.

Подготовка специалистов по организации и безопасности дорожного движения осуществляется в рамках специальности 1-44 01 02 «Организа-

ция дорожного движения». Форма обучения – *дневная и заочная*. Квалификация – *инженер-инспектор*.

По специальности 1-44 01 02 предусмотрены специализации:

- 1-44 01 02 01 «Управление дорожным движением»;
- 1-44 01 02 02 «Безопасность дорожного движения»;
- 1-44 01 02 03 «Экспертиза в дорожном движении».

Ведется подготовка магистрантов и аспирантов.

Повышение квалификации специалистов по направлениям образования «Транспорт» и «Транспортная деятельность» ведется в РИИТ БНТУ для категорий специалистов:

- руководители и специалисты технических служб;
- руководители и специалисты служб эксплуатации;
- руководители и специалисты служб безопасности дорожного движения парков автомобильного и городского электрического транспорта;
- преподаватели и мастера производственного обучения управлению механическим транспортным средством автоучебных организаций
- руководители и специалисты диагностических станций и пунктов технического контроля по проведению государственного технического осмотра транспортных средств

Для переподготовки специалистов по деятельности на автомобильном транспорте открыта новая специальность 1-44 01 71 «Организация и выполнение автомобильных перевозок» на базе высшего образования по следующим профилям, направлениям и группам специальностей: право – 24, экономика – 25, управление – 26, экономика и организация производства – 27, экологические науки – 33, техника и технологии – 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 53, 54, 55, 57, строительство – 70, сельское, лесное хозяйство и садово-парковое строительство – 74.01, 74.05, 74.06, 75, медицина – 80, туризм и гостеприимство – 89, общественное питание и бытовое обслуживание – 91, защита от чрезвычайных ситуаций – 94, военное дело – 95.01, 95.02, экономическая безопасность – 96.

Типовым учебным планом специальности 1-44 01 71 предусмотрены следующие дисциплины:

- а) Гуманитарные и социально-экономические:
 - Основы идеологии белорусского государства;
- б) общепрофессиональные:
 - Экономика транспортной деятельности;
 - Маркетинг и логистика на транспорте;
 - Общий курс транспорта и страхование;
 - Основы теории транспортных процессов и систем;
- в) дисциплины специальности:

- Организация и выполнение внутриреспубликанских автомобильных перевозок;
- Организация и выполнение международных автомобильных перевозок;
- Автомобильные транспортные средства и их техническая эксплуатация;
- Менеджмент и информационные технологии на автомобильном транспорте;
- Обеспечение безопасности выполнения автомобильных перевозок;
- Транспортно-экспедиционная деятельность.

Длительность обучения по специальности 1-44 01 71 по формам получения образования представлена в таблице 1.

Табл. 1

Учебная программа, в неделях	Форма получения образования		
	Очная (дневная)	Очная (вечерняя)	Заочная
Аудиторные занятия, нед.	16	32	10
Самостоятельная работа, нед.	1	2	53
Текущая аттестация, нед.	1,5	1,5	1,5
Итоговая аттестация (государственный экзамен), нед.	0,5	0,5	0,5
Продолжительность обучения, мес.	4,5	8,5	15

Объем учебной программы по специальности 1-44 01 71 по формам получения образования представлен в таблице 2.

Табл. 2

Учебная программа, в часах	Форма получения образования		
	Очная (дневная)	Очная (вечерняя)	Заочная
Всего	1000	1000	1000
Аудиторные,	704	640	500
в т. ч. общепрофессиональные дисциплины и дисциплины по специальности	688	624	488

Введение переподготовки по специальности 1-44 01 71 «Организация и выполнение автомобильных перевозок» на базе высшего образования будет способствовать росту профессиональной компетентности специалистов и, соответственно, повышению эффективности транспортной деятельности.

Аналогичная переподготовка необходима, но не введена на базе среднего специального образования. Она предусмотрена постановлением Совета Министров республики Беларусь № 971 от 30.06.08 г., однако до настоя-

щего времени не осуществляется. Введение данной подготовки будет способствовать сокращению специалистов с высшим образованием и увеличению специалистов со средним специальным образованием, которые могут занять должности в автотранспортных, экспедиторских компаниях, не требующих наличия высшего образования.

Планируется в ближайшее время открытие новых специальностей в области логистических услуг, управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте и интеллектуальных транспортных систем в дорожном движении.

УДК 621.01(075.8)

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ, МАШИН И МАНИПУЛЯТОРОВ»

В. Ф. Коренский

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Излагается опыт разработки и использования в теории механизмов, машин и манипуляторов (ТММ и М) учебно-методических комплексов (УМК) для курсового проектирования машин по параметрам машинных технологий.

Предварительная (общенаучная) подготовка студентов в вузе по физике, химии, математике и механике представляет собой углубление знаний по положениям, с которыми студент знакомится в средней школе. Методики подготовки в школе и в вузе по этому циклу дисциплин принципиально не различаются. Отсутствие практического применения этих знаний к будущей профессии студента снижает интерес и к их получению.

К освоению будущей профессии студент-гражданин должен подходить обстоятельно, с должным вниманием и ответственностью. Азы профессии, которые формулируются и закладываются в дисциплине ТММ и М, он должен изучить наиболее тщательно.

Дисциплина ТММ и М имеет достаточную физико-математическую научную базу, богатую историю развития машиностроения. Программой [1] ее изучения предусмотрен машиноведческий курсовой проект, первый в профессиональной деятельности инженера-механика. Поэтому эту дисциплину уместно рассматривать как ключевую (не эпизодическую). В процессе обучения студент может и должен понять, в чем истинное назначение профессии инженера-механика, какова ее суть и общественная значимость.

В процессе изучения дисциплины студент должен осознать:

1) как от результатов изучения общественного спроса на продукцию перейти к проектированию машины для изготовления этой продукции (т. е. с чего следует начать проектирование);

2) какую роль выполняет проект по ТММ и М в системе реального проектирования новых машин, и может ли студент воспользоваться приобретаемыми знаниями при изучении смежных дисциплин и при прохождении производственных практик на промышленных предприятиях;

3) этапы осуществления проектирования в вузе: в чем значение курсовых и дипломного проектирований;

4) какова роль получаемых в вузе навыков проектирования в профессиональной деятельности инженера-механика.

Выполнив проект по ТММ и М, студенты механических специальностей должны получать осязаемый опыт проектирования, проверять себя в конкретных условиях творческой работы.

Указанные цели проектирования по дисциплине ТММ и М, входные параметры и алгоритм выполнения проекта впервые обсуждались на Всесоюзном семинаре заведующих кафедрами и ведущих лекторов по «Теории механизмов и машин» вузов СССР 12 – 21 сентября 1989 г. в КПИ, г. Калинин [2]. Затем они уточнялись на методических семинарах в Республике Беларусь [3, 4], в том числе в ПГУ. В ПГУ к обсуждению привлекались ведущие преподаватели выпускающих кафедр. Проект направлялся на конкурсы НИРС РБ в 2000–2003 учебных годах и получил поощрительные грамоты, а также дипломы I и II степени.

В результате проведенных исследований разработан УМК [5], в котором традиционный курс ТММ и М перестроен таким образом, что главное внимание в нем отведено машинам, механизмы рассматриваются как структурные составляющие машин, требования к которым устанавливаются на основе общих требований к машинным технологиям. Сами машины рассматриваются как инструмент, создаваемый инженерами и рабочими для выполнения технологических операций. Технологии определяют содержание технических заданий на проектирование новых машин.

Курсовой проект по ТММ и М естественным образом занял нишу первого этапа проектирования машин. В Единой системе конструкторской документации (ЕСКД) этот этап называют этапом разработки технического предложения. Разработка технического предложения вовлекает студента в русло реального проектирования, способствует его профессиональному росту, помогает на ранних этапах обучения своевременно решать социально-этические проблемы и задачи, связанные с выбором профессии.

Разработаны технические задания для проектирования более 20 различных технологических машин. Методика внедрена в учебный процесс кафедры механики Полоцкого государственного университета.

Таким образом, курсовое проектирование стало стержнем дисциплины ТММ и М, началом последующей общепрофессиональной подготовки студента. Лекционные, лабораторные и практические занятия по этой дисциплине направлены на решение указанных задач.

В последние годы в связи с заявленной целью Республики Беларусь в области образования вступить в Болонский процесс возрастает роль информационных технологий. В настоящее время эти технологии нередко используются в коммерческих целях. В этих условиях возрастает роль справочных материалов, разрабатываемых в помощь студентам самими кафедрами.

На кафедре механики ПГУ в качестве таких материалов рекомендован «Атлас итоговых чертежей к образцам курсовых проектов по ТММ и М». Чертежи выполнены студентами под руководством преподавателя с использованием УМК. По мнению разработчика, атлас будет служить своеобразным «маяком» при выполнении студентами каждого выданного им задания, облегчит решение задач оформления, расположения, представления результатов, выбора масштабов построений и т. п. Одновременно он обеспечит большую четкость при выдаче заданий и проведении консультаций, лучшее понимание общих задач синтеза машин. Наконец, он позволяет оперативно изменять объемы проектирования в зависимости от общей подготовки студентов и может быть эффективно использован для организации их дистанционного обучения.

Атлас издается как приложение ко второй части УМК, названного выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория механизмов, машин и манипуляторов : типовая программа для инженерно-технических специальностей вузов / П. П. Анципорович, В. К. Акулич. – Минск : БГПА, 2001.
2. Коренский, В. Ф. Методические основы реального проектирования по ТММ / В. Ф. Коренский // Задачи кафедр теории механизмов и машин по реализации перестройки высшего образования в стране : материалы Всесоюз. семинара зав. каф. и ведущих лекторов вузов страны, Калинин, 12–21 сент. 1989 г. / Калининский политехн. ин-т – Калинин, 1989.
3. Коренский, В. Ф. Основы проблемного проектирования по курсу ТММ / В. Ф. Коренский // материалы зонального науч.-метод. совещ.-семинара зав. каф. и ведущих лекторов по ТММ вузов респ. Прибалтики, Белоруссии и Калининградской обл. РСФСР в целях реализации основных направлений перестройки и дальнейшего повышения качества преподавания по ТММ, Вильнюс, 25–26 янв. 1990 г. / Вильнюсский инж.-строит. ин-т – Вильнюс, 1990.

4. Коренский, В. Ф. Новые принципы в курсовом проектировании по ТММ / В. Ф. Коренский // Технические вузы – республике : материалы 52-й Междунар. науч.-техн. конф. проф., преподавателей, науч. работников, аспирантов и студентов БГПА. В 7 ч. Ч. 2 : Динамика и прочность машин. – Минск, 1997.
5. Коренский, В. Ф. Теория механизмов, машин и манипуляторов: учеб.-метод. комплекс. В 2 ч. / В. Ф. Коренский. – Новополоцк : ПГУ, 2008, 2009.

УДК 681

ОБ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ УСПЕШНОСТИ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Л. С. Турищев

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

На примере преподавания строительной механики предлагается методика организации контроля успешности обучения студентов с применением модульной технологии и рейтинговой системы оценки знаний на основе компетентностного подхода.

Важной особенностью образования XXI века является то, что оно должно не столько вооружать студента готовыми знаниями, сколько сформировать у него способность самостоятельно приобретать их в течение всей своей активной жизни. С этой целью при преподавании строительной механики для студентов технических специальностей используются современные приемы реализации образовательного процесса:

- формирование интегрированных знаний, умений и навыков;
- обучение методологии деятельности;
- придание самостоятельной работе студента роли одной из главных форм обучения.

Причина пристального внимания к самостоятельной работе студентов в том, что современный рынок труда оценивает профессиональную подготовку специалиста не в терминах знания-умения-навыки, а через понятие «компетентность». Поэтому перед высшей школой стоит задача использования компетентностного подхода в образовательном процессе. Применительно к подготовке инженеров его суть заключается в формировании у них готовности и способности к решению разнообразных профессиональных задач, связанных с высоким уровнем сложности проектируемых, возводимых и реконструируемых инженерных конструкций. Отсюда и радикальное изменение роли самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа студента трактуется как активное и целенаправленное преобразование студентом получаемой информации при изучении строительной механики на всех этапах в знания, умения и навыки расчета несущих конструкций на прочность, жесткость и устойчивость, применяемые в проектно-конструкторской деятельности инженера. С этой целью студенты, следуя В. П. Беспалько [1], при изучении строительной механики осуществляют два вида деятельности – репродуктивную и продуктивную.

В первом случае от студента требуется уметь осуществлять:

- деятельность с подсказкой, включающую цель, описание стандартной ситуации и алгоритм действий студента;
- деятельность по памяти, включающую цель, описание стандартной ситуации, но требующую самостоятельных алгоритмических действий студента.

Во втором случае от студента требуется уметь осуществлять:

- деятельность в нестандартной ситуации, включающую цель и описание ситуации, но требующую самостоятельных эвристических действий студента;
- исследовательскую деятельность, включающую описание цели в общем виде, требующую самостоятельной конкретизации ситуации и самостоятельного определения программы действий, ведущих к достижению цели.

Большое значение при изучении строительной механики придается контролю успешности обучения студентов, который побуждал бы студентов к систематической репродуктивной и продуктивной деятельности в процессе обучения строительной механике.

Такого отношения студентов к процессу обучения позволяет добиться рейтинговая система контроля успешности обучения [2]. Суть рейтинговой системы контроля успешности обучения заключается в том, что учебная деятельность студентов в семестре по всем ее видам и на всех ее этапах изучения строительной механики оценивается в баллах. По определенным правилам баллы объединяются в интегральный показатель – рейтинг студента по строительной механике.

Введены следующие составляющие успешности изучения студентом строительной механики в семестре:

- отношение к изучению строительной механики;
- уровень знаний и умений по строительной механике, проявляемых студентом в течение семестра;
- творческая активность.

Отношение студента к изучаемой дисциплине в семестре характеризуется отсутствием пропусков учебных занятий без уважительных причин и своевременностью выполнения и защиты расчетно-проектировочных работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины.

Уровень знаний и умений студента в течение семестра устанавливается с помощью следующих форм текущего контроля: письменные контрольные работы, коллоквиумы, защита расчетно-проектировочных работ, рубежные зачеты по модулям, на которые разделено содержание дисциплины.

Творческая активность студента при изучении строительной механике характеризуется научными публикациями, имеющими прямое отношение к изучаемой дисциплине; участием с докладами на университетских, областных и Республиканских студенческих научных конференциях; выполнением творческих заданий; изучением внепрограммных материалов и составлением по ним рефератов.

В целях повышения продуктивности рейтинговой системы при изучении строительной механики осуществляется:

- внедрение модульной технологии обучения;
- применение нестандартных форм текущего контроля знаний и умений;
- информационно-методическое обеспечение учебного процесса с помощью учебно-методических комплексов.

Модульная технология обучения обеспечивает четкое структурирование содержания обучения и системную организацию текущего контроля его успешности. Естественным продолжением модульной технологии обучения является применение тестовой методики для организации текущего контроля. Использование тестов позволяет эффективно проверять успешность овладения студентами как репродуктивной, так и продуктивной деятельности, связанной с дисциплинами кафедры.

Логическим завершением применения модульной технологии обучения и тестовой методики его контроля служат учебно-методический комплекс [3]. Такая форма информационно-методического обеспечения учебного процесса определяет целевую программу действий студента, обеспечивает его соответствующими средствами обучения и создает условия для самоуправления студентами процессом обучения строительной механике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалько, В. П. Системно-методическое обеспечение учебно-воспитательного процесса подготовки специалистов / В. П. Беспалько, Ю. Г. Татур. – М. : Высш. шк., 1989. – 143 с.
2. Положение о рейтинговой системе контроля успешности обучения студентов в Полоцком государственном университете / Л. С. Турищев. – Новополоцк : ПГУ, 2005. – 35 с.
3. Турищев, Л. С. Строительная механика : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» / Л. С. Турищев. – Новополоцк : ПГУ, 2005. – 223 с.

КАК ПОДНЯТЬ ПРЕСТИЖ АСПИРАНТУРЫ ПО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ

А. В. Крыленко

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Молодежь в науке – проблема, которая поднимается не первый год и стоит достаточно остро. Молодежь делает выбор в пользу бизнеса, в то время как профессорско-преподавательский состав высшей школы стареет. Недобор в аспирантуру – колоссальная проблема. Ведь инновационное развитие государства требует высококвалифицированных специалистов. Поэтому престиж аспирантуры по машиностроительным специальностям нужно повышать.

Министерство образования обеспокоено тем, что аспирантура теряет актуальность для выпускников вузов. Престиж преподавательской деятельности падает. Систему защиты научных степеней независимые эксперты называют несовершенной. В вузах уже ощутили нехватку молодых специалистов.

В настоящее время ситуация с престижем аспирантуры по машиностроительным специальностям достаточно сложная. Все последние годы многие вузы и Национальная академия наук Беларуси не выполняли план по приему в аспирантуру. Беларусь существенно отстает по такому важному показателю европейского инновационного табло, как выпуск аспирантов и докторантов в расчете на тысячу человек населения в возрасте 25...34 лет. В последние годы доля выпускников вузов, которые идут в науку, сокращается. Образование с точки зрения получения степени кандидата или доктора наук становится непрестижным.

Средняя эффективность аспирантуры в НАН Беларуси 6 %, а по Министерству образования 4 % – таково соотношение ежегодного числа аспирантов, защитивших диссертации в срок, и общего количества выпуска аспирантов.

Фактически молодежь не заинтересована в том, чтобы идти работать в вузы. В основном корень проблемы лежит в материальной плоскости. Преподаватели вообще получают мало, а молодые преподаватели – еще меньше. После окончания университета (а часто и магистратуры) ребята приходят в аспирантуру и получают стипендию. Заработок тех, кто пойдет работать, как минимум, будет вдвое больше. Вот студент и думает, то ли

ему заняться наукой, то ли деньги зарабатывать. Да и после окончания аспирантуры и даже защиты диссертации, годам к тридцати, получать он будет меньше, чем на производстве.

В вузах, конечно, делается все, чтобы поддержать будущего ученого. Дается возможность дополнительного заработка: через зачисление на полставки на научные темы или на преподавательскую работу. Финансируются поездки на конференции, оказывается содействие в поиске грантов и многом другом.

На начальном этапе следует помочь студенту, который тяготеет к занятию научной деятельностью, принять верное решение. Бывают моменты, когда студент колеблется. Допустим, его интересует научная деятельность, но он сомневается, стоит ли продлевать в связи с этим время обучения. Вот тогда на помощь ему должен прийти хороший педагог. Если отмахнуться, сказать: принимай такое решение, какое хочешь, скорее всего, молодой человек уйдет. Но если он увидит, что в нем заинтересованы, что он не будет предоставлен сам себе, обязательно останется. Для пополнения рядов молодых ученых особенно важно не потерять самых способных, не упустить этот момент.

В вузах есть программы, определяющие, сколько студентов должно быть вовлечено в научную работу, составляются планы набора в аспирантуру. Однако в погоне за количественными показателями может быть упущено качество.

Качество подготовки аспирантов, несомненно, величина особенно важная. Хотя во многих вузах находятся недобросовестные руководители, не уделяющие должного внимания своему подопечному. Поэтому подбор педагогических кадров в вузе должен быть под особым контролем.

Отучиться в аспирантуре – это только полдела. Важно вовремя защитить кандидатскую диссертацию. Хотя год окончания аспирантуры в этом смысле не определяющий. Защиту не следует откладывать в долгий ящик. Вуз должен стимулировать этот процесс. Тем, кто защищается по окончании аспирантуры, следует назначать премии: это касается как руководителей, так и аспирантов. Так что заинтересованность здесь будет обоюдная.

И все же многие защиты проходят в последующие годы. Этому есть объяснение: три года для подготовки кандидатской работы – маловато, поскольку за это время нужно сдать кандидатский экзамен по специальности, проделать большой объем научной работы, написать научные статьи, опубликовать их в журналах и внедрить свою разработку на предприятии. Поэтому зачастую защиты происходят уже через 3...5 лет после окончания

аспирантуры. Но суть даже не в этом. Важно, что страна получает специалиста с инновационным мышлением.

Помимо непрестижности преподавательского труда на низкой эффективности аспирантуры сказывается несовершенство системы защиты диссертаций. Часть выпускников так и не решаются дойти до защиты. Здесь много причин. Написать кандидатскую диссертацию и ее защитить – большая и тяжелая работа, за которую еще и платят немного. Вторая причина – в достаточно высоких требованиях Высшей аттестационной комиссии к диссертациям.

Эта система сложилась еще в советские годы. Она является вызовом нормам академических свобод. В мировой практике ученая степень присваивается конкретным университетом. В Беларуси часть диссертаций, прошедших вузовский ученый совет, отклоняется ВАК. С другой стороны, аспиранты просто опасаются выходить на защиту диссертации, потому что не знают, чем это закончится. Поэтому стоило бы несколько смягчить требования к диссертационным работам.

Все же в нашей стране молодой ученый достаточно защищен и ощущает на себе заботу государства. Может быть, государство не может дать ему сразу высокую зарплату, зато этот заработок стабильный. И, конечно, у него хорошие перспективы в будущем. Работа в науке очень интересная, уважаемая в обществе. Это возможность работать на международном уровне, увидеть мир, показать себя и свою страну.

УДК 621.793.7

ТРЕБОВАНИЯ К ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЯМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

**Н. В. Спиридонов, И. О. Соков, Л. И. Пилецкая,
Е. В. Домаш, Е. Л. Бузун**

Белорусский национальный технический университет, Минск

Представлены требования к газотермическим покрытиям, предназначенным для дальнейшей обработки концентрированными потоками энергии (КПЭ), обеспечивающие требуемый комплекс физико-механических свойств.

Процесс обработки напыленных покрытий КПЭ в режиме оплавления должен обеспечивать высокие эксплуатационные свойства оплавленных слоев покрытия, что определяется следующими условиями: образова-

нием высокой прочности сцепления с основой, достигаемой при установлении химических связей, и выявлением предельных физико-механических свойств наносимого материала.

Перед определением технологических параметров обработки покрытий КПЭ необходимо установить требования к подготовке поверхности перед напылением, определить метод напыления, режимы и толщину напыляемого покрытия.

Подготовка поверхности для газотермического напыления имеет целью формирование ее свойств, облегчающих активацию в процессе напыления. Это достигается при выполнении ряда условий:

- 1) удалении адсорбированных газов, влаги, загрязнений и шаржированных твердых частиц;
- 2) удалении или максимально возможном уменьшении толщины окисных пленок;
- 3) создании определенной микротопографии поверхности;
- 4) нагреве поверхности и создании специальных физико-химических свойств поверхностных слоев деталей.

Так как обработка концентрированными потоками энергии – локальный и высокоскоростной процесс, то окислительные реакции на границе «покрытие – основа» не успевают развиваться и в этом отношении требования к качеству подготовки поверхности являются пониженными по сравнению с обработкой объемными тепловыми потоками.

Могут применяться широко используемые на практике механические способы подготовки поверхности, в основе которых лежат пластическое деформирование и разрушение поверхностного слоя материалов. Наиболее эффективными являются методы, основанные на откалывании материала основы. Поверхность скола имеет повышенную плотность подвижных структурных дефектов, прежде всего дислокаций и их скоплений, ответственных за развитие процесса пластической деформации основы при напылении. В результате формируется характерная для каждого способа шероховатость поверхности, а пластическая деформация, как правило, приводит к измельчению зерна в поверхностном слое и некоторому его текстурированию, что является благоприятным с точки зрения повышения прочности сцепления покрытия с основой (за счет повышения энергии связи). Области выхода скопления дислокаций на поверхность представляют собой активные центры, в которых преимущественно протекает взаимодействие контактирующих материалов. Относительная прочность сцепления частицы с основой составляет:

$$G = \Delta \varepsilon \frac{S}{b} \sqrt{\rho},$$

где $\Delta \varepsilon$ – прирост пластической деформации основы при соударении с напыляемой частицей;

S – площадь активного центра; $S \approx \pi(15b)^2$;

b – модуль вектора Бюргерса;

ρ – плотность дислокации в поверхностном слое основы.

Параметры шероховатости основы, оптимальные для образования прочного соединения, зависят как от физических характеристик напыляемых частиц и их размеров, так и от свойств поверхности основы. С ростом высоты микровыступов растет пластическая деформация вершин микровыступов и ухудшаются условия контакта во впадинах. При микронеровностях, соизмеримых с напыляемыми частицами, роль микровыступов в активации образования связи невелика. Их значение повышается при небольшой пластической деформации основы.

Выбор метода нанесения покрытий под последующую обработку концентрированными потоками энергии определяется такими качественными характеристиками слоя, как прочность сцепления, плотность, равномерность по толщине и окисляемость. Последняя характеристика является малоисследованной, но имеет исключительно большое значение для скоростных высокотемпературных процессов. Оксидные включения в покрытиях и на границе с основой из-за низкой теплопроводности являются тепловыми барьерами и ведут к перегреву этих участков.

Исследование окисляемости покрытий при плазменном и газопламенном методах в зависимости от режимов процессов представлено на рисунке 1.

В целом окисляемость покрытий ниже при плазменном напылении, что объясняется меньшей продолжительностью нахождения частиц напыляемого материала при высокой температуре и инертностью среды, в которой происходит напыление, по сравнению с газопламенным методом. Из режимов наиболее значительное влияние на содержание кислорода в покрытии при плазменном напылении оказывает расход плазмообразующего газа, в меньшей мере – дистанция напыления и сила тока.

При газопламенном напылении наиболее существенное влияние на окисляемость оказывают давление кислорода в горючей смеси и дистанция напыления.

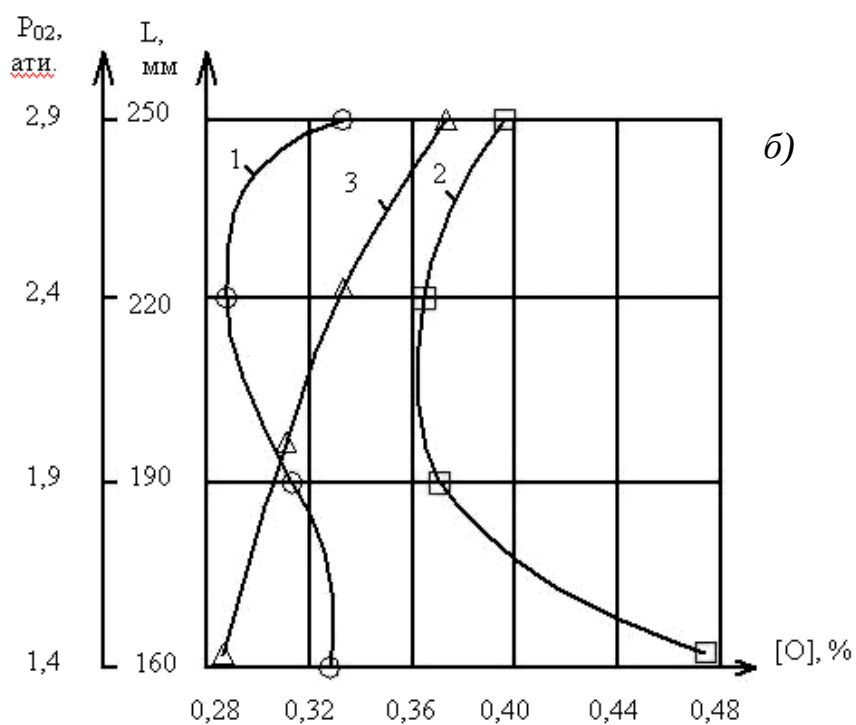
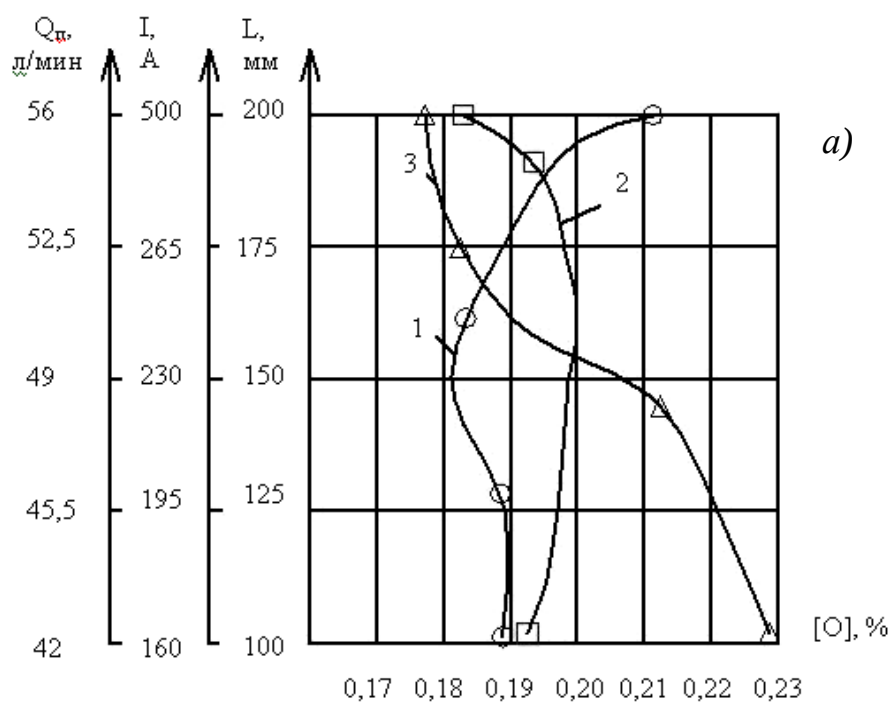


Рис. 1. Окисляемость покрытий при газотермическом напылении:
 а) плазменное напыление: 1 – изменение дистанции напыления L , ($I = 200 \text{ А}$, $U = 95 \text{ В}$, $Q_n = 52 \text{ л/мин}$); 2 – изменение силы тока I , ($U = 95 \text{ В}$, $L = 160 \text{ мм}$, $Q_n = 52 \text{ л/мин}$); 3 – изменение расхода плазмообразующего газа Q , ($I = 200 \text{ А}$, $U = 95 \text{ В}$);
 б) газопламенное напыление: 1, 2 – изменение дистанции напыления L , ($P_{O_2} = 1,8 \text{ ати}$, $P_{O_2} = 2,8 \text{ ати}$); 3 – изменение давления кислорода P_{O_2} , ($L = 200 \text{ мм}$)

Наиболее предпочтительным методом нанесения покрытий под последующую обработку концентрированными потоками энергии в отношении окисляемости и других характеристик покрытия – прочности сцепления и плотности является плазменное напыление при следующих режимах: $I = 230... 265$ А; $L = 150... 175$ мм; $Q_{\text{п}} = 49... 52,5$ л/мин. Можно применять и газопламенное напыление при режимах: $P_{\text{O}_2} = 1,9... 2,4$ ати, $L = 160... 200$ мм, но с несколько худшими качественными показателями покрытий, что вполне допустимо для малоответственных деталей.

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

И. О. Сокоров, Н. В. Спиридонов, А. С. Володько
Белорусский национальный технический университет, Минск

Представлены результаты исследования композиционных покрытий, формируемых газотермическим напылением с последующей термической обработкой (оплавление). На основе полученных результатов выбраны композиции рекомендованные для упрочнения-восстановления деталей легкой промышленности.

Достигнутый уровень физико-механических и эксплуатационных свойств газотермических покрытий позволяет использовать их для упрочнения-восстановления деталей пар трения, работающих в условиях интенсивного изнашивания, в широком диапазоне удельных нагрузок и скоростей скольжения. На способность покрытий выдерживать в процессе изнашивания определенные силовые воздействия влияют характер приложения нагрузки, а также форма и жесткость детали.

Технологический процесс нанесения покрытий включает подготовку порошкового материала, детали и собственно нанесения покрытия. Перед напылением производили дробеструйную обработку поверхности. Предложено две технологии плазменного и газопламенного напыления с оплавлением.

Технологические параметры плазменного напыления с учетом проведенных экспериментальных исследований (установка УПУ-3Д): сила тока дуги – $240...250$ А; напряжение – $80...85$ В; дистанция напыления – $170...180$ мм; расход плазмообразующего газа – $3,0...3,5$ м³/ч; расход порошка – $1,5...2,5$ кг/ч.

При газопламенном напылении (установка ТРУ-БПИ): дистанция напыления $L = 200$ мм, расход горючего газа МАФ – $1...1,2$ м³/ч, расход кислорода – $4,5...5$ м³/ч, расход воздуха – $0,2$ м³/ч. Рекомендуемая толщина покрытия, напыляемая за один ход горелки $h_x = 0,25$ мм.

Композиции для напыления

№ композиции	Состав композиции (в объемных долях)
1	ПГ–СРЗ (1/2) + ПР–Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
2	ПР–НД42СР (1/2) + ПР–Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
3	ПГ–10К-01 (1/2) + ПР–Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
4	ПР–Х4Г2Р4С2Ф (1/3) + ПГ–СРЗ (1/3) + ПГ–10К-01 (1/3)
5	ПТ–19Н-01 (1/2) + ПР–Х4Г2Р4С2Ф (1/2)

При изучении микроструктуры (рис. 1) напыленных покрытий установлено, что распределение частиц различных химических элементов по покрытию гетерогенное, это свидетельствует о неоднородности исходных композиций, неравномерном налипании частиц по поверхности частиц в исходном порошке, а также это может быть обусловлено разными условиями застывания частиц.

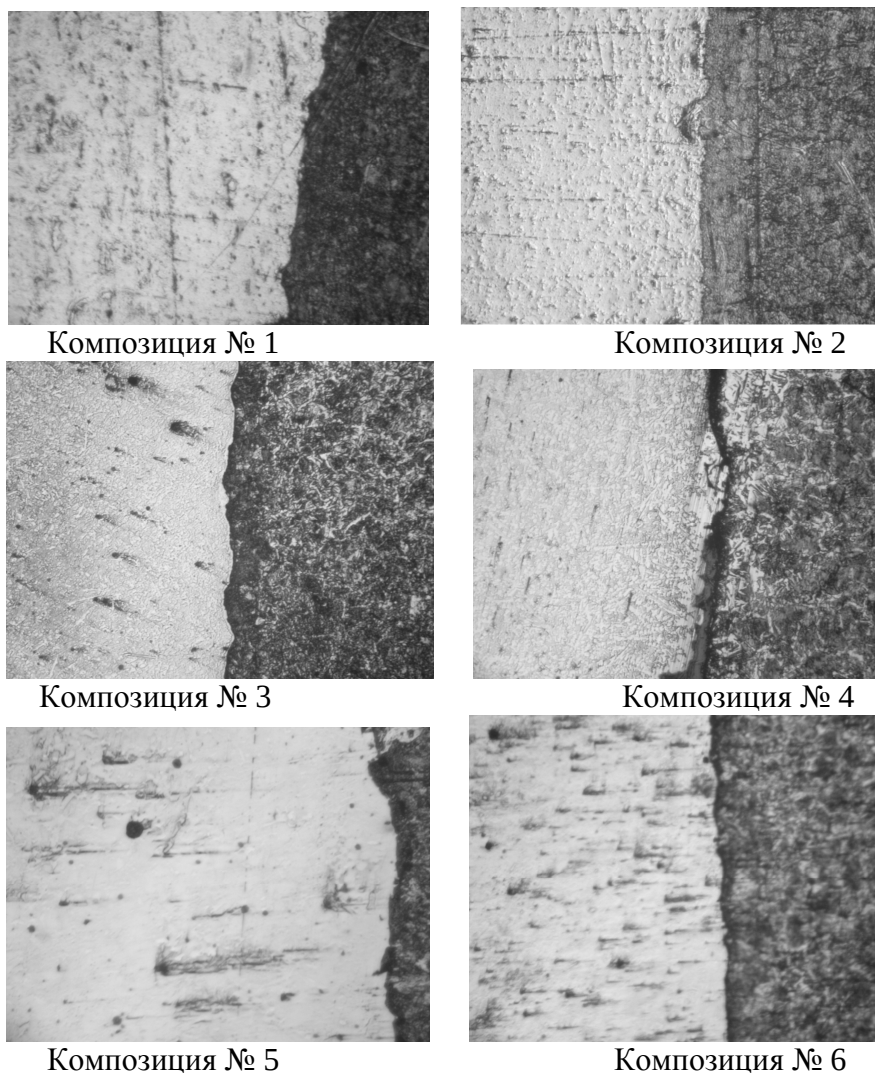


Рис. 1. Микроструктура покрытий

Установлено, что введение самофлюсующихся порошков, позволило уменьшить пористость покрытий до 3 %, за счет уплотнения покрытия при их формировании и заполнения пор, которые возникают при использовании «чистого» порошка на основе железа. Послойное формирование покрытий обуславливает неравномерность площади пор в сечении, нормальном границе раздела между покрытием и основой, и в сечении параллельном границе.

Анализ структуры покрытий показал, что у покрытий граница с основой менее четкая. Распределение элементов порошка по покрытию – гетерогенное, что вызвано предположительно неравномерным прилипанием частиц различных композиционных материалов.

Установлено, что при изнашивании изначально по всей поверхности контакта имеет место комбинация адгезионного (на более твердых участках) и упругопластического взаимодействия поверхностей, при котором продуктами изнашивания являются тонкодисперсные равновесные частицы. В общем случае для анализируемых условий трения характерно образование вторичных структур оксидного типа. По мере увеличения удельной нагрузки происходит нарушение когезионного взаимодействия между частицами, их выкрашивание и разрушение отдельных неоднородных частиц.

Установлено, что коэффициент трения для всех испытуемых материалов плавно увеличивается с ростом относительной скорости скольжения и удельной нагрузки. Интенсивность увеличения коэффициента трения с повышением нагрузки в месте контакта больше, чем с увеличением относительной скорости скольжения. Это увеличение коэффициента трения сопровождается ростом температуры в зоне трения, что приводит к переходу металла в состояние термической пластичности.

Установлено, что сопротивляемость покрытия изнашиванию зависит от химического состава покрытия, который определяет твердость и теплостойкость, а также свойства образующихся в процессе трения вторичных структур. Структура покрытия состоит из мелкодисперсных боридов и карбидов, равномерно распределенных в насыщенной легированными элементами матрице, что определяет его повышенную твердость и теплостойкость.

Фракция порошков в пределах 80...140 мкм, т.е. разброс размеров частиц весьма значителен. Очевидно, наиболее крупные из них в газопламенной струе не могут в достаточной мере пластифицироваться, что определяет явление отскока. Наличие большого количества окалины, окисляемость покрытий во время напыления определяется большим содержанием кислорода в струе при газопламенном напылении, что ведет и к повышенному его содержанию в напыленном слое. Однако, применение оптимальных режимов и оплавление сводит к минимуму недостатки газопламенного напыления, обеспечивая низкую пористость покрытий (менее 1...2%), высокую пластификацию частиц напыляемого материала и равномерное распределение твердых включений.

По разработанным технологиям упрочнения были изготовлены образцы деталей с покрытиями (рис. 2).

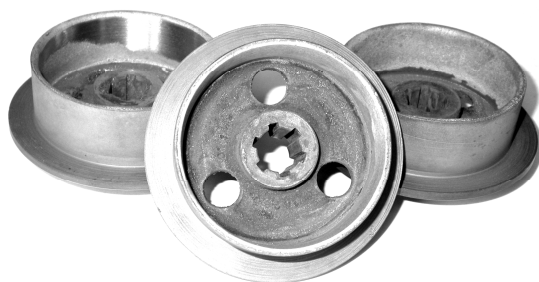


Рис. 2. Упрочненные детали легкой промышленности

УДК 621.791.72

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА СОСТАВ ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

**О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, Н. И. Луцко,
А. А. Ковальчук, А. С. Лапковский**

Белорусский национальный технический университет, Минск

Анализируются современные методы быстрого прототипирования и место лазерной наплавки в этих методах. Рассматривается влияние режимов лазерной наплавки на распределение элементов в наплавленных валиках из самофлюсующегося сплава на основе никеля.

Одной из проблем современного производства является время, которое затрачивается на разработку технологии, а, следовательно, и на получение готовой продукции. В производстве лимитирующим для многих изделий является время, требующееся для конструирования и изготовления литейных форм и штампов всех типов. Активно развивающиеся в последние годы методы быстрого прототипирования (rapid prototyping – RP) и быстрой обработки (rapid tooling – RT) призваны помочь в процессе подготовки нового продукта посредством его визуализации непосредственно из базы данных CAD и последующего прямого изготовления продукта путем нанесения материалов с использованием лазеров [1].

Последние разработки технологий direct metal deposition (DMD), light engineered net shaping (LENS) и direct light fabrication (DLF) продемонстрировали, что объемные объекты с плотностью близкой к полной, могут быть произведены непосредственно из базы данных CAD со свойствами эквивалентными процессу пластической деформации. Эти и ряд других подобных

технологий уже потенциально возможны для прямого изготовления деталей и штампов [2, 3, 4].

Во всех упомянутых технологиях для непосредственного нанесения металлического материала используется метод лазерной наплавки. Лазерная наплавка – это технология создания покрытий, включающая нанесение материалов разной природы на металлическую подложку с использованием в качестве источника энергии лазерного луча [5].

Состав покрытия, образуемого при лазерной наплавке особенно важен для исследования, так как для придания покрытиям высоких физико-механических характеристик для наплавки используются многокомпонентные материалы, имеющие сложный состав, который в процессе наплавки претерпевает серьезные изменения. Данные о влиянии режимов лазерной наплавки на состав покрытия после наплавки позволяют прогнозировать результат наплавки и свойства наплавленного слоя.

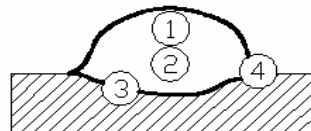
В настоящей статье нами предпринята попытка исследовать фактическое распределение элементов в наплавленных валиках из самофлюсующегося сплава на основе никеля в процессе лазерной наплавки.

Для выполнения исследований использовали лазерный технологический комплекс, включавший газовый CO_2 -лазер непрерывного действия типа «Комета 2» и координатную систему, обеспечивавшую необходимое перемещение луча лазера относительно образцов.

Луч лазера через систему поворотных зеркал и линзу направлялся на поверхность образца. Фокус потока порошка, подаваемого по наклонным каналам коаксиального сопла, совпадал с фокусом лазерного излучения. Лазерная наплавка производилась при мощности излучения лазера 1000 Вт, величина подачи порошка составляла 12 г/мин, скорость наплавки варьировалась от 40 до 120 мм/мин. Дистанция наплавки, определяющая положение фокуса лазерного луча относительно поверхности образца, изменялась от 10 до 14 мм. Для каждого случая наносились единичные валики. Наплавка выполнялась на образцы изготовленные из стали 45. В качестве наплавочного материала использовался порошок самофлюсующегося сплава на основе никеля – ПГ-10Н-01, с грануляцией 20 – 80 мкм.

Распределение элементов определяли на поперечных шлифах валиков с помощью рентгеновской дифракционной системы SmartLab RIGAKU (X-ray diffraction system), а снимки микроструктур делали на металлографическом микроскопе с видеофиксацией МИКРО 200. Исследовавшиеся на каждом шлифе валика наплавки зоны приведены на рисунке 1.

Рис. 1. Зоны исследовавшиеся на шлифах валиков при определении распределения элементов



Для каждой зоны валика были получены зависимости содержания железа, никеля, хрома и кремния в покрытии от скорости наплавки при различных дистанциях наплавки. Результаты исследований приведены на рисунках 2 – 6.

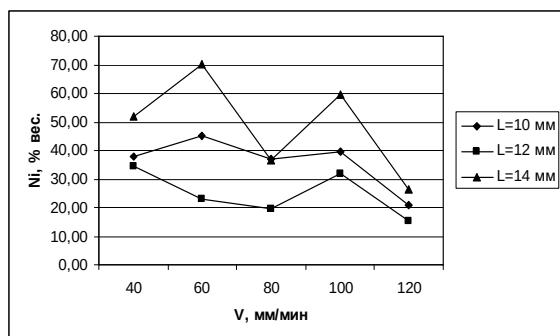


Рис. 2. Содержание никеля, % вес. в зоне 1 (покрытие) при различных скоростях V и дистанциях L наплавки

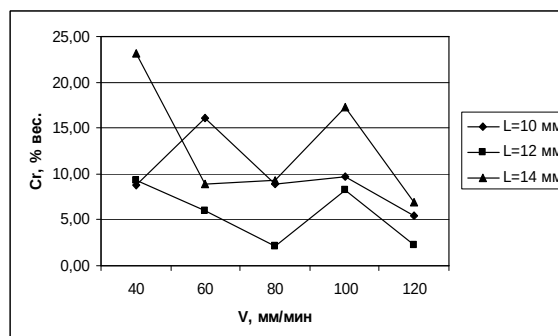


Рис. 3. Содержание хрома, % вес. в зоне 1 (покрытие) при различных скоростях V и дистанциях L наплавки

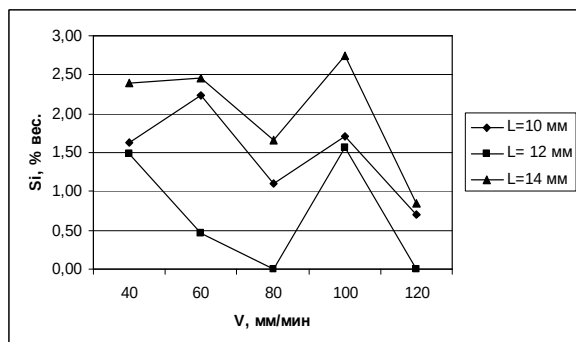


Рис. 4. Содержание кремния, % вес. в зоне 1 (покрытие) при различных скоростях V и дистанциях L наплавки

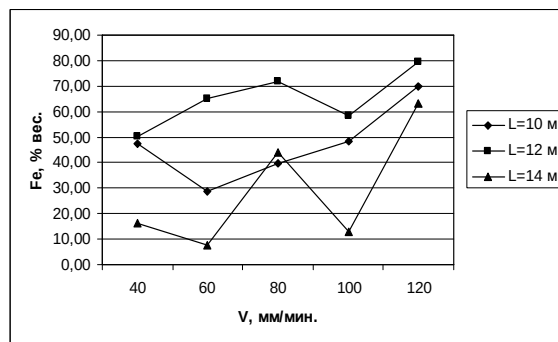


Рис. 5. Содержание железа, % вес. в зоне 1 (покрытие) при различных скоростях V и дистанциях L наплавки

Как видно из приведенных данных, наибольшее содержание никеля (см. рис. 2), хрома (см. рис. 3) и кремния (см. рис. 4) в покрытии наблюдается при дистанции наплавки $L = 14$ мм (расфокусированный луч, фокус над поверхностью основы) для всех исследованных зон валиков, т.е. в случае, когда имеет место минимальный переплав основы. Наименьшее содержание никеля, хрома и кремния в покрытии имеет место при дистанции наплавки $L = 12$ мм (фокус на поверхности основы, также для всех зон валиков), что может свидетельствовать о переплаве поверхности основы, когда часть этих элементов из покрытия переходит в последнюю. С увеличением скорости наплавки наблюдается уменьшение содержания никеля, хрома и кремния в покрытии, хотя следовало бы ожидать уменьшения степени переплава основы и выноса указанных элементов из покрытия. Наиболее вероятно, определяющую роль в этом случае играет эффект экранирования покрытия испарениями, возникающими при расплавлении частиц

порошка в зоне воздействия лазерного излучения [6]. При малой скорости сканирования испарение более интенсивное, экранирование достаточно сильное, никель, хром и кремний меньше переходят в основу. При большой скорости сканирования испарение сильно уменьшается, экранирование незначительное, указанные элементы интенсивно переходят в основу.

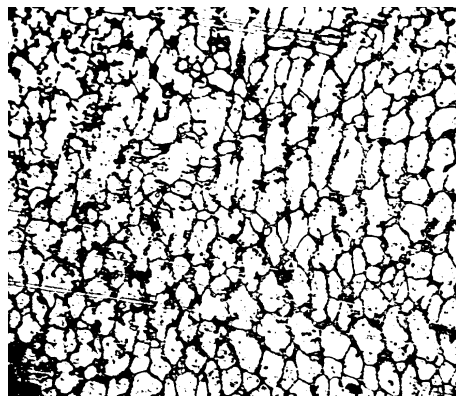


Рис. 6. Микроструктура сплава ПГ-10Н-01 после лазерной наплавки при $V = 100$ мм/мин и $L = 10$ мм в зоне 1, $\times 980$

В процессе наплавки имеет место ожелезнение материала получаемого покрытия. При этом содержание железа в покрытии (см. рис. 5) для всех зон валиков минимально при дистанции $L = 14$ мм (расфокусированный луч, фокус над поверхностью основы), что хорошо согласуется с наименьшим переплавом основы в этом случае. Наибольшее содержание железа в покрытии наблюдается при дистанции $L = 12$ мм (фокус на поверхности основы), т.е. когда происходит наибольший переплав основы и взаимное перемешивание покрытия с основой. С увеличением скорости наплавки содержание железа в покрытии увеличивается во всех случаях, хотя из-за уменьшения вводимой энергии можно было бы ожидать обратного. Здесь, опять же, сказывается эффект экранирования излучения испарениями материала покрытия, когда при малой скорости наплавки испарения больше экранируют излучение и железо меньше переходит в покрытие. При большой скорости наплавки испарений выделяется меньше, экранирование слабое, железо больше переходит в покрытие.

Сравнивая зависимости содержания элементов в покрытии от технологических режимов лазерной наплавки в различных зонах валиков можно отметить, что какие-либо существенные отличия между ними отсутствуют. Из этого факта можно заключить, что скорее всего температура валика из-за его сопоставимости по размеру с диаметром лазерного пятна распределяется достаточно равномерно по его объему и эффект перемешивания протекает в разных зонах идентично. Этот факт также подтверждается тем, что микроструктуры покрытия во всех зонах практически не отличаются (см. рис. 6).

Таким образом, полученные результаты показывают следующее:

1. В валиках полученных методом лазерной наплавки самофлюсующегося сплава на основе никеля – ПГ-10Н-01 морфология структуры во всех исследованных зонах имеет сходный характер, что подтверждает наличие сильного перемешивания жидкой ванны расплава.

2. Наблюдается четкая зависимость распределения элементов в покрытии от режимов лазерной наплавки.

3. С увеличением скорости наплавки содержание никеля, хрома и кремния в покрытии уменьшается, а содержание железа увеличивается. При этом обнаруживается сильное влияние эффекта экранирования покрытия испарениями, возникающими при расплавлении частиц порошка в зоне воздействия лазерного излучения. Это приводит к тому, что при малой скорости наплавки, когда испарение более интенсивное, никель, хром и кремний меньше переходят в основу, а железо меньше проникает в покрытие. При большой скорости наплавки, когда испарение значительно уменьшается, наблюдается противоположный эффект.

4. Наибольший перенос элементов из основы в покрытие и наоборот, из покрытия в основу, наблюдается при дистанции наплавки 12 мм, когда фокус лазерного луча находится на поверхности основы, а наименьший – при дистанции наплавки 14 мм, когда фокус находится над поверхностью основы.

5. Все установленные закономерности одинаково действуют во всех исследованных зонах валиков, что свидетельствует о равномерном распределении температуры по сечению валика, полученного лазерной наплавкой, и одинаковых процессах перемешивания, протекающих во всех зонах валиков.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Wohlers, T. Wohlers Report – Rapid Prototyping / T. Wohlers // Tooling & Manufacturing State of the Industry. – Colorado : Wohlers Associates Inc., 2003.
2. Mazumder, J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure / J. Mazumder, A. Schifferer, J. Choi // Mater Res Innovat. – 1999. – № 3. – P. 118 – 131.
3. Keicher, D.M., Smugersky JE. The laser forming of metallic components using particulate materials / D.M. Keicher, J.E. Smugersky // J. Metals. – 1997. – № 49 (5). – P. 51 – 54.
4. Directed light fabrication a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition / J.O. Milewski [et al.] // J. Mater Process Tech. – 1998. – № 75(1-3). – P. 165 – 172.
5. Toyserkani, E. Laser Cladding / E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin. – Florida : CRS Press, Boca Raton, 2005.
6. Liu, C.Y. Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding / C.Y. Liu, J. Lin // Opt. Laser Technol. – 2003. – № 35 (2) – P. 81 – 86.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

Л. М. Акулович, А. В. Миранович, А. В. Линник, А. М. Ефимов
*Белорусский государственный аграрный
технический университет, Минск*

Проведены эксперименты по исследованию влияния электромагнитных систем с постоянными и электромагнитами на величину и характер распределения магнитной индукции.

Известны основные технологические схемы магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) деталей типа тела вращения и плоских поверхностей [1, 2]. Приведенные варианты упрочнения имеют свои преимущества и недостатки. Так, использование первой схемы приводит к уменьшению коэффициента использования ферромагнитного порошка до значений 0,70 – 0,78, так как при упрочнении происходит выброс частиц из рабочей зоны вследствие недостаточной синхронизации работы бункера-дозатора с осцилляцией полюсного наконечника и частотой следования импульсов технологического тока [2, 3]. При этом полюсный наконечник в меньшей степени подвержен тепловому воздействию, благодаря чему облегчаются условия (устойчивость, стабильность процесса упрочнения) и ресурс работы. При использовании схемы для плоских деталей формирование упрочненного слоя происходит нестабильно из-за неравномерности подачи ферромагнитного порошка в рабочую зону устройства. Однако данная технологическая схема упрочнения позволяет осуществлять наплавку торцовых и боковых поверхностей изделий одновременно [4].

Известно, что формирование покрытий на поверхности изделий при МЭУ происходит в рабочей зоне – пространстве, ограниченном полюсным наконечником и деталью, в котором образуется многоэлектродная система из частиц ферропорошка в результате воздействия на них электромагнитного поля [2]. Рабочая зона установок МЭУ образуется электромагнитной системой, представляющей собой совокупность источников электрического и магнитного полей с магнитопроводами. В качестве источника внешнего магнитного поля в рабочей зоне, предназначенного для формирования цепочек микроэлектродов при МЭУ, используются электромагниты на выпрямленном или переменном (пульсирующем) токе, которые позволяют получать периодически изменяющуюся во времени величину магнитной индукции [3].

Ранее проведенные исследования [4, 5] показывают, что переменный характер магнитной индукции на границах участков с различным магнитным сопротивлением способствует хаотичному распределению ферропорошка

в рабочем зазоре. В результате градиент магнитной индукции $\text{grad}\vec{B}$ на отдельных участках рабочего зазора изменяется с частотой образования цепочек из частиц ферропорошка. При этом в момент паузы между двумя последовательными импульсами электромагнитного поля не происходит образование новых цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре, и электродуговой разряд не возникает. Процесс МЭУ идет неустойчиво с короткими замыканиями и одиноким пульсирующим «горением» цепочек порошка в рабочем зазоре. По этой причине важно было дать оценку влияния временных характеристик электромагнитного поля и распределения индукции в рабочем зазоре на процесс формирования покрытий на поверхности изделия.

Для этого проведены исследования распределения индукции внешнего магнитного поля в рабочей зоне установок МЭУ с электромагнитами. Питание электромагнитных катушек в первом случае осуществлялось от сети переменного тока промышленной частоты, а во втором – от выпрямителя, обеспечивающего частоту магнитного поля 0,5 ... 12,5 Гц (рис. 1, а).

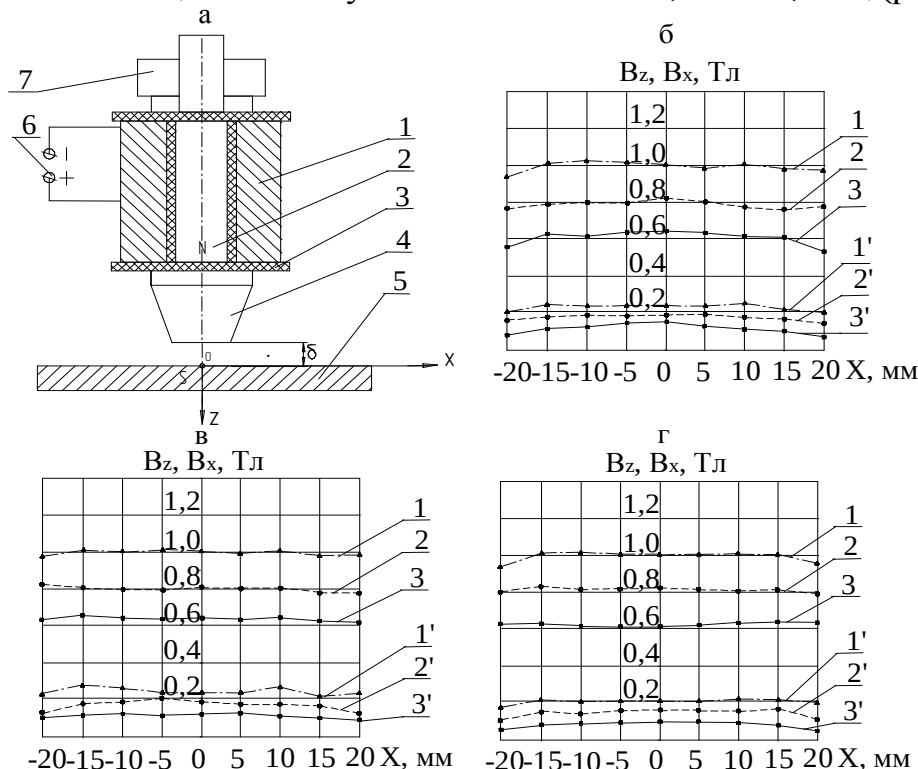


Рис. 1. Электромагнитная система установки МЭУ: а – 1 – обмотка; 2 – сердечник; 3 – изолятор; 4 – полюсный наконечник; 5 – изделие; 6 – источник питания; 7 – оправка; распределение продольной B_z и поперечной B_x составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре ($\delta = 2,0$ мм) для электрических магнитов с частотой $\nu = 50$ Гц; б – $\nu = 12,5$ Гц; в – $\nu = 0,5$ Гц; г – при силе тока электромагнитной катушки: 1 – 3,5 А; 2 – 2,5 А; 3 – 1,5 А; X – расстояние от продольной оси полюсного наконечника

Измерения выполняли теслаамперметром Ф4354/1 и специальными щупами с датчиками Холла, установленными на краях и в центре рабочего зазора.

По изменению величины индукции в различных точках оценивали интенсивность магнитного поля в рабочей зоне. Анализ результатов эксперимента показывает, что знакопеременные магнитные поля (частотой $\nu = 0,5$, $\nu = 12,5$ и $\nu = 50$ Гц, индукцией в рабочей зоне $B = 0,3 \dots 0,9$ Тл) не достаточно однородны (рис. 1, б, в, г), что вызывает поперечные колебания и миграцию не только цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре, но и электродуговых разрядов. При этом процесс наплавки происходит неустойчиво с короткими замыканиями и одиноким пульсирующим горением цепочек ферропорошка в рабочем зазоре.

Для исключения колебаний цепочек-микроэлектродов ферропорошка в рабочем зазоре предложено использовать системы с постоянными магнитами (рис. 2, а) [5, 6]. Это технологическое решение позволяет отказаться от источника питания с переменными или импульсными электрическими магнитами, упростить конструкцию установки ЭМН, исключить необходимость в герметизации катушек от попадания смазочно-охлаждающей жидкости, уменьшить габаритные размеры и массу.

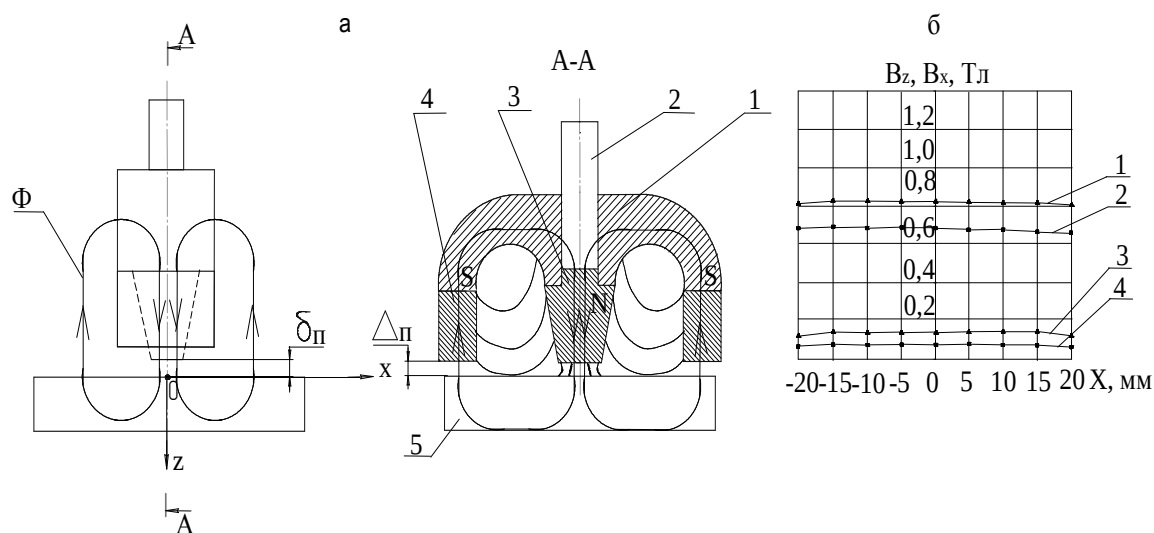


Рис. 2. Магнитная система установки МЭУ: а – 1 – постоянный магнит; 2 – сердечник; 3 – полюсный наконечник; 4 – наконечник; 5 – изделие; б – распределение продольной B_z и поперечной B_x составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре: 1, 3 – для постоянных магнитов с расположением одноименных полюсов под углом 90° ; 2, 4 – для постоянных магнитов с расположением одноименных полюсов под углом 180° ; X – расстояние от продольной оси полюсного наконечника

Анализ результатов исследования распределения индукции внешних магнитных полей в рабочей зоне установок МЭУ с постоянными магнитами (рис. 2, б) показывает, что получено более однородное распределение продольной B_z и поперечной B_x по торцу полюсного наконечника в рабочем зазоре, чем для переменных или импульсных электрических магнитов.

С целью проверки эффективности разработанной магнитной системы по обеспечению стабильности и устойчивости процесса МЭУ, проведены испы-

тания, которые показывают, что сплошность покрытий увеличилась на 9... 12 %, производительность – на 25 %. Установлено, что в рабочей зоне магнитной системы с магнитотвердыми материалами создается магнитное поле более однородное, чем в системе с электрическими магнитами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Борисов, Б.П. Исследование и разработка процесса магнитно-электрического упрочнения деталей машин в условиях фазового сдвига активирующих факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.П. Борисов; ФТИ АН БССР. – Минск, 1983. – 19 с.
2. Ракомсин, А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А.П. Ракомсин. Под ред. П.А. Витязя. – Минск : Парадокс, 2000. – 201 с.
3. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Новополоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
4. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки / Ж.А. Мрочек [и др.] // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 75 – 84.
5. Акулович, Л.М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58 – 65.
6. Миранович, А.В. Повышение ресурсо- и энергосбережения процесса электромагнитной наплавки / А.В. Миранович, Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 4. – С. 29 – 33.

УДК 621.793

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА

**А. Э. Паршутто, Ю. Г. Алексеев, В. С. Нисс,
А. Ю. Королёв, Г. Е. Слепнёв**

Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск

Разработана установка микродугового оксидирования алюминиевых и титановых сплавов с системой управления на базе микропроцессора. Разработанная установка позволяет формировать оксидные покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками.

Разработка новых экологически чистых технологий нанесения покрытий для защиты и упрочнения металлических изделий является весьма важной задачей современной техники в связи с ростом требований к условиям применения, специфическим характером применяемых технологических сред и соответствующим повышением требований к конструкционным материалам.

Микродуговое оксидирование (МДО) – прогрессивный вид электрохимической обработки и упрочнения металлических материалов, являющийся

дальнейшим развитием анодирования. Микродуговое оксидирование позволяет получать multifunctional керамические покрытия с таким комплексом свойств, как износостойкость, коррозионностойкость, теплостойкость, в качестве электроизоляционных и декоративных покрытий.

Важнейшей особенностью микродугового оксидирования является образование в процессе формирования покрытия поверхностных электрических микродуговых разрядов, оказывающих решающее воздействие на создаваемое покрытие, в результате которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышаются по сравнению с обычными анодными пленками. Другими положительными отличительными чертами процесса МДО являются его экологичность, а также отсутствие необходимости тщательной предварительной подготовки поверхности.

Технология микродугового оксидирования в настоящее время используется для обработки сплавов алюминия, титана и находит широкое применение в различных областях производства: товары бытового назначения, медицина, приборостроение, аэрокосмическая промышленность.

Разработанная в Технопарке БНТУ «Политехник» установка для МДО включает в себя источник технологического питания, привод поднятия и опускания обрабатываемых изделий в ванну обработки, систему поддержания необходимых тепловых и гидравлических режимов МДО (перемешивание, циркуляция и охлаждение электролита), и систему, обеспечивающую электробезопасность и санитарные условия для работы оператора (рис. 1).

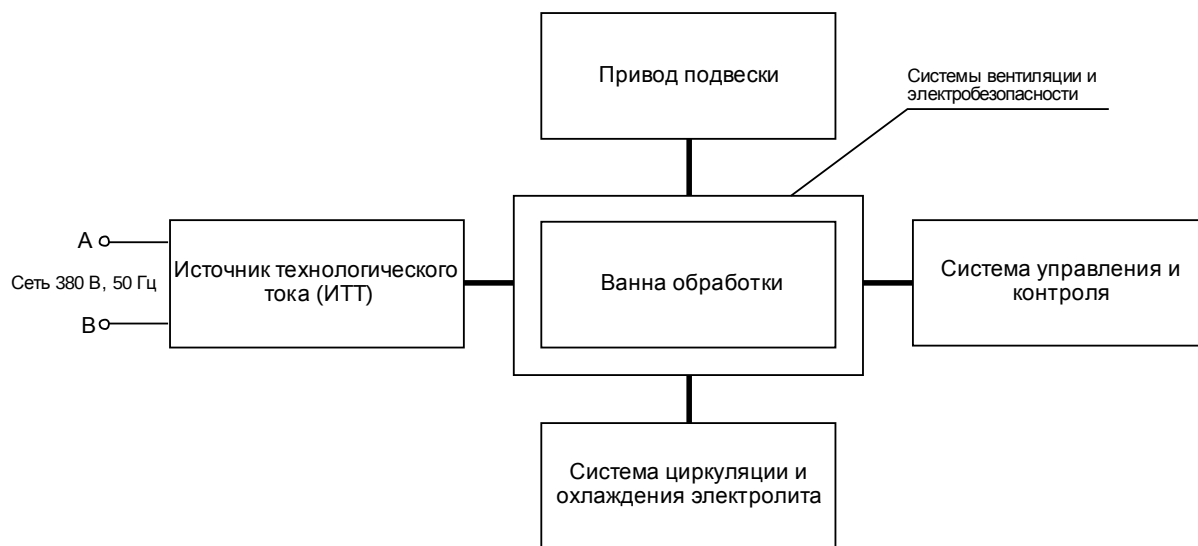


Рис. 1. Функциональная схема установки МДО

Важнейшей составной частью разработанной и изготовленной установки МДО является источник технологического тока, блок-схема которого показана на рисунке 2.

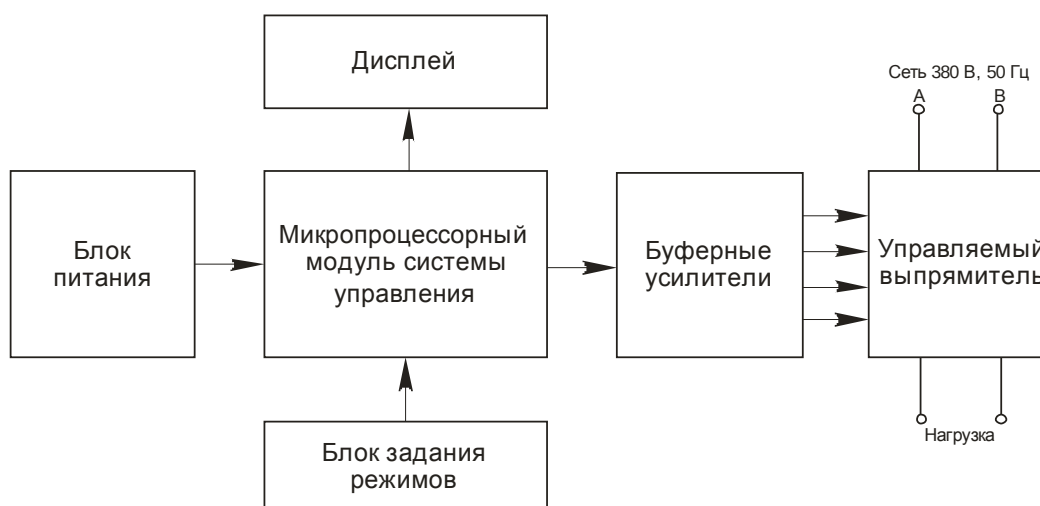


Рис. 2. Блок-схема источника питания установки МДО

Источник технологического тока (ИТТ) позволяет использовать различные режимы обработки. В разработанном источнике питания применен гальваностатический анодно-катодный режим с участием бестоковой паузы в жестком режиме.

Жесткость разряда (через время чисто электрохимического и микродугового воздействия на материал, а также через действующие значения токов, которые определяют температуру в разряде) влияет на такие конечные характеристики МДО-покрытий, как твердость, пористость, пробойное напряжение и т.д. Эти режимы определяются выходными параметрами источников питания для МДО, влияющими на начало и окончание микродугового разряда в каждом полупериоде. При жестком режиме начальная разность потенциалов, заведомо больше критической, что обеспечивает принудительное начало пробоя. Окончание разряда для жесткого режима определяется формой напряжения источника технологического тока в нагрузке и классифицируется как принудительное.

Источник технологического тока установки МДО выполнен в виде двух последовательно включенных однофазных полууправляемых выпрямительных мостов на диодах и тиристорах с цифровой системой управления (см. рис. 2). Такая схема позволяет получить биполярные импульсы технологического напряжения с регулируемой длительностью в диапазоне 1 – 10 мс и амплитудой до 520 В положительной и отрицательной полярности. В качестве метода контроля угла открывания тиристорov выбрана система импульсно-фазового управления (СИФУ). В данной системе преобразование сигналов осуществляется в цифровой форме и выполняется по алгоритму аналоговой СИФУ. На вход цифровой СИФУ в цифровых системах регулирования подается код, а преобразование сигналов, выполняемых в аналоговой СИФУ, в цифровой СИФУ заменено соответствующим преобразованием кодов.

Микропроцессорный модуль управления, выполненный на процессоре Atmel Atmega 16, формирует импульсы для управления тиристорами моста, а также формирует стробирующий импульс в момент перехода фазного напряжения фазы через ноль. Этот импульс используется в микропроцессорной системе как стробирующий (синхронизирующий), по которому запускается блок управления, и формируются программным путем стробирующие импульсы каждой фазы. Разработанная установка позволяет оксидировать детали площадью до 500 см² и создавать оксидные покрытия толщиной до 150 мкм.

В результате испытаний разработанной установки выполнено оксидирование имплантатов, изготовленных из сплава ВТ6. Предварительные исследования показали, что полученное покрытие имеет высокую микротвердость и коррозионную стойкость (рис. 3).

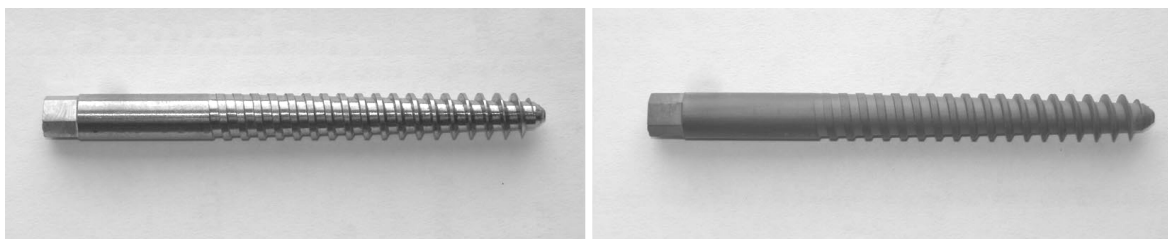


Рис. 3. Имплантат из сплава ВТ6 до и после оксидирования

УДК 621.793.7:669.35:621.8

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ШНЕКОВ ЭКСТРУДЕРОВ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. М. Власовец

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

В. Я. Лебедев

*Белорусский государственный аграрный
технический университет, Минск*

Рассматриваются условия эксплуатации шнеков, факторы, вызывающие износ рабочих поверхностей, способ их восстановления нанесением антифрикционных покрытий.

Экструдер – машина для размягчения (пластикации) материалов и придания им формы путем продавливания через профилирующий инструмент (т.н. экструзионную головку – фильеру), сечение которого соответст-

вует конфигурации изделия. Процесс переработки материалов в экструдере называется экструзией.

В пищевой промышленности метод экструзии широко применяется при производстве пищевых продуктов, полуфабрикатов для мясной, молочной и кондитерской промышленности, кормов для крупного рогатого скота и более сложных кормов для домашних животных.

При экструзии под действием значительных скоростей сдвига и высокого давления происходит переход механической энергии в тепловую. При этом материал сжимается, разогревается, пластицируется и гомогенизируется, что приводит к различным по глубине изменениям в качественных показателях перерабатываемого сырья, происходит, например, денатурация белка, клейстеризация и желатинизация крахмала, а также другие биохимические изменения.

Принцип работы экструдера представлен на рис. 1.

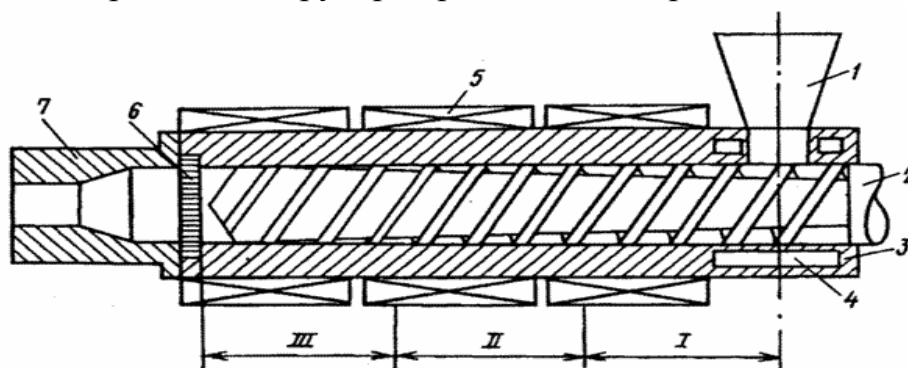


Рис. 1. Схема одношнекового экструдера: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – цилиндр; 4 – полость для циркуляции воды; 5 – нагреватель; 6 – решетка с сетками; 7 – формующая головка (фильера)

Материал из бункера поступает в зону загрузки экструдера. Вращающийся шнек увлекает и продвигает материал вдоль цилиндра. За счет трения материала о стенки цилиндра и поверхности шнека, а также при помощи нагревателей материал разогревается, перемешивается и уплотняется. Высокое давление, возникающее в уплотненной зоне, позволяет продавить вязкий материал (экструдат) через фильеру. Основным рабочим органом экструдера является шнек, который работает по принципу вращающегося винта. Спиральная часть шнека перемещает материал, расположенный в полостях между корпусом экструдера и винтовым пером шнека.

Шнеки для пищевой промышленности изготавливают из коррозионностойких сталей марок X18H10, 12X18H9, 10X14AГ15, 08X22H6T, 17X18H9, 12X18H10T и др. Это обусловлено их хорошей сопротивляемостью действию органических кислот, слабых минеральных кислот, азотной кислоты, а также устойчивостью к воздействию агрессивных моющих и дезинфицирующих растворов. Рост микроорганизмов в рабочей среде не распространяется на поверхность из нержавеющей стали, а бактерии,

грибки и т.п. не имеют шансов развиваться на ее поверхности, что определяет высокую популярность «пищевого» применения таких сталей.

При эксплуатации шнек работает в условиях высоких температур, давления и абразивного истирания. Основными причинами отказов экструдеров являются абразивное изнашивание, схватывание рабочих поверхностей, надрывы, поверхностные и подповерхностные трещины, коррозионные (очаговые, межкристаллические) и эрозионные поражения винтовой поверхности шнека и внутренней поверхности корпуса экструдера. В результате изнашивания происходит изменение геометрических размеров винтовой поверхности шнека (другие названия – «спираль шнека», «перо шнека»), увеличивается зазор между гребнем («кромкой») винтовой поверхности шнека и внутренней поверхностью корпуса экструдера.

Для разделения гребня шнека и корпуса экструдера, изготовленных, как правило, из одинаковых материалов, применяют ряд технических приемов, например, нанесение бронзовых или латунных ленточек на гребень. При эксплуатации таких шнеков наблюдается как изнашивание разделительного материала, так и скалывание его, а также проявляется подповерхностная коррозия.

Восстановление шнека наплавкой антифрикционными материалами позволяет продлить ресурс и повысить качество его работы, уменьшить время на приработку, а также снизить шум и вибрации. Антифрикционные сплавы при наплавке плохо плавятся, а наплавленный слой имеет склонность к образованию трещин. Например, двойные алюминиевые бронзы обладают повышенной износостойкостью, но очень хрупки и непригодны для наплавки. В связи с низкими пластическими свойствами высокоалюминиевых бронз, легированных железом, в процессе эксплуатации в наплавленном слое образуются трещины, которые под воздействием среды и внутренних напряжений увеличиваются в размерах. Латунь, бронза и двойные медно-никелевые сплавы имеют низкую стойкость против изнашивания при коррозионно-механических воздействиях. Алюминиево-железные бронзы обладают ограниченной растворимостью, изменяющейся с температурой.

Существенное преимущество перед описанными материалами имеет материал типа CuSi_3 . Покрытия из него обладают достаточной прочностью в сочетании с высокой текучестью присадочного материала благодаря содержанию кремния.

По сравнению с другими способами нанесения износостойких покрытий (напыление, гальванические и др.) технология наплавки позволяет получать достаточно большие толщины покрытия, имеет высокую производительность без ограничений по размерам наплавливаемых поверхностей.

Свойства покрытия и его соединение с основным металлом в большой мере зависят от глубины проплавления основного металла, перемешивания основного металла с наплавливаемым. При этом, как правило, чем

больше глубина проплавления, степень перемешивания и переход элементов основного металла в металл наплавки, тем хуже свойства как металла наплавки, так и соединения в целом.

Наиболее полно удовлетворяют требованиям минимальной глубины проплавления основного металла способы плазменной наплавки. Энергетические, тепловые и газодинамические параметры струи низкотемпературной плазмы сравнительно легко регулируются в широких пределах. Это позволяет получать наплавленные покрытия с высокой износостойкостью и стойкостью при работе в химически агрессивных средах.

Для нанесения ремонтных покрытий толщиной 1 – 2 мм и более с небольшой глубиной проплавления основного металла и малым перемешиванием основы с наплавляемым материалом целесообразно применить плазменно-порошковую наплавку. Этот способ наплавки выбран для нанесения слоя антифрикционного и коррозионностойкого материала непосредственно на гребень витка шнека. Для снижения потерь наплавляемого материала при восстановлении гребня применяли вставки из графита, посредством которых формируется «ванна» для расплавленного материала. При наплавке в качестве источника нагрева использовалась плазменная дуга, а присадочным материалом служила проволока CuSi_3 производства «Lastek».

Для вращения детали и перемещения плазмотрона относительно витка может использоваться токарно-винторезный станок либо какой-нибудь другой механизм, позволяющий следить за шагом витка.

УДК [519.713; 519.711:53]+004.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЗАКАЛКИ

А. В. Лемзиков

*Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск*

С. П. Кундас

*Международный государственный экологический университет
им. А. Д. Сахарова, Минск*

С. В. Медведев, С. В. Гусев

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск*

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой программных средств, позволяющих осуществлять моделирование процессов экс-

плуатации сборочных единиц с учетом результатов термической обработки деталей.

Моделирование поведения термически обработанной детали в условиях нагрузки в составе сборочной единицы представляет значительный практический интерес, так как позволяет определить влияние режимов обработки на надежность полученной конструкции. Применение компьютерного моделирования при выборе указанных режимов термической обработки позволяет сократить затраты ресурсов на проведение натурных экспериментов, повысить качество получаемой продукции.

В настоящее время существует ряд программных комплексов, позволяющих осуществлять моделирование процессов термической обработки [1] и механического взаимодействия деталей [2]. Однако ни в одном из них в полной мере не реализованы механизмы совместного решения указанных задач, подразумевающие учет влияния термообработки деталей на эксплуатационные характеристики сборок. Разработка программных средств, обладающих указанной функциональностью, осуществляется в рамках выполнения задания 1.2.02 Государственной программы научных исследований «Информатика и космос».

Для решения поставленной задачи предложена методика моделирования процессов закалки и последующей эксплуатации деталей, состоящая в следующем:

- для моделирования закалки применяется программный комплекс «ThermoSim 2», разработанный в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники. Указанный комплекс позволяет осуществлять моделирование процессов индукционной термической обработки стальных деталей и получать распределения полей напряжений и деформаций, фазового состава и твердости [1];

- результирующее напряженно-деформированное состояние детали после закалки переносится в программный комплекс LS-DYNA (многоцелевой конечно-элементный комплекс разработки Livermore Software Technology Corp), работающий на базе суперкомпьютера «СКИФ» Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. Используемые в LS-DYNA методы решения обеспечивают эффективный расчет сложных задач контакта [2], что позволяет применять его для моделирования процессов эксплуатации деталей в составе сборочных единиц.

Практическая реализация предложенной методики требует разработки алгоритмов и программных средств, позволяющих переносить результаты расчета между моделями, включающими различные конечно-

элементные сетки. Необходимо отметить, что моделирование процессов термической обработки деталей с помощью программного комплекса «ThermoSim 2» может осуществляться на персональных ЭВМ (32-х или 64-х разрядных), но для решения за приемлемое время контактной задачи механического взаимодействия нескольких тел необходимо использовать вычислительные мощности суперкомпьютера. В результате конечно-элементные сетки, используемые в каждом случае, могут не совпадать с точки зрения количества узлов, типа конечных элементов и положения в пространстве. Подобная ситуация продемонстрирована на рис. 1.

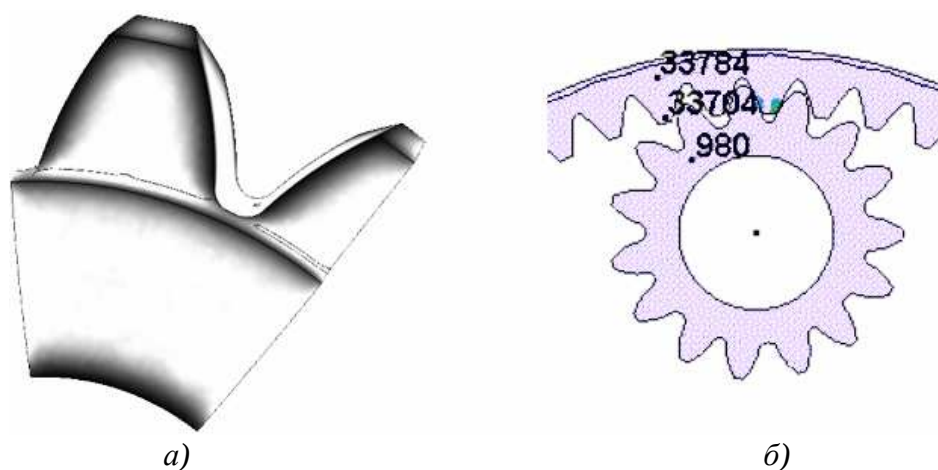


Рис. 1. Отличия в геометрической информации, используемой при моделировании:
а – в программном комплексе «ThermoSim 2»;
б – в программном комплексе LS-DYNA

Как видно на рис. 1, *а*, при моделировании процесса термической обработки в «ThermoSim 2» для уменьшения вычислительной сложности решаемой задачи была выделена симметричная часть детали (полтора зуба шестерни), что позволило значительно ускорить расчет и увеличить его точность за счет уменьшения размера конечных элементов. В то же время при моделировании контактной задачи в LS-DYNA (см. рис. 1, *б*) используется полная геометрия деталей в связи с необходимостью анализировать полный цикл нагрузки.

В настоящее время в рамках «ThermoSim 2» добавлен программный модуль, позволяющий «доставлять» недостающую геометрию (и полученные в ходе моделирования поля температур, распределение структурных составляющих и напряженно-деформированное состояние), используя заданную пользователем информацию об особенностях симметрии детали.

Следующим направлением разработки является перенос информации о результирующих напряжениях, возникающих при закалке (тензор на-

пряжений, вычисляемый в программном комплексе «ThermoSim 2»), на конечно-элементную сетку, используемую в LS-DYNA (в область INITIAL_STRESS_SOLID входного файла указанного программного комплекса). При этом необходимо учесть, что в общем случае могут применяться разные типы трехмерных конечных элементов (например, 4-х или 8-миточечные, с различными степенями аппроксимирующего полинома), узлы которых не совпадают в пространстве. Решаемая при этом задача интерполяции обладает определенной вычислительной сложностью и требует оптимизации программного кода для эффективного решения за приемлемое время.

После решения указанных задач появится возможность проводить моделирование процессов эксплуатации сборочных единиц с учетом влияния различных режимов термической обработки деталей, что в перспективе позволит оптимизировать указанные процессы, повысить износостойкость деталей и надежность конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лемзиков, А.В. Программный комплекс «ThermoSim 2» для моделирования процессов индукционной закалки / А.В. Лемзиков, Д.Г. Иванов; под ред. П.С. Гурченко // сб. трудов Международной научно-технической конференции «Теория и практика энергосберегающих процессов в машиностроении». 19-21 ноября 2008 г. – Минск: ОСПИ., 2008. – С. 175 – 179.
2. LS-DYNA. Keywords User's Manual. Version 971. – 2005. – LSTC. – 1862 p.

УДК 544.542.1; 621.357.9

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ СПЛАВОВ Zn-Ni, ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ В ПОЛЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. Г. Валько, И. И. Кургузенкова

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы

Проведено исследование элементного состава Zn-Ni покрытий, полученных из нейтрального электролита в поле рентгеновского излучения. Установлено, что действие рентгеновского излучения в процессе электроосаждения Zn-Ni покрытий способствует увеличению содержания никеля в сплаве. Методом полного факторного эксперимента получены зависимости содержания никеля от плотности катодного тока и мощно-

сти экспозиционной дозы рентгеновского излучения, действующего на электролит в процессе осаждения.

Для получения гальванических покрытий сплавами Zn-Ni определенного элементного и фазового состава необходимо жестко контролировать условия электроосаждения и состав электролитов [1]. Одним из методов, позволяющих изменять концентрацию элементов в сплавах, сохраняя постоянным состав электролита, является метод воздействия рентгеновского излучения на электрохимическую систему [2]. Действие рентгеновского излучения на электролит вследствие радиолиза приводит к появлению активных радикальных частиц, которые, участвуя в окислительно-восстановительных реакциях, изменяют процесс первичной кристаллизации и способствуют восстановлению на катоде сплавов с модифицированными свойствами и составом [3].

Целью данной работы являлось исследование влияния рентгеновского излучения на формирование и элементный состав Zn-Ni покрытий, а также прогнозирование содержания никеля в получаемых сплавах.

Сплав Zn-Ni осаждался на неиндифферентных подложках из низкоуглеродистой стали 08кп. Осаждение проводилось из нейтрального (рН = 7) электролита следующего состава (г/л): окись цинка – 15, хлорид никеля – 90, хлорид аммония – 250, борная кислота – 30. Температура во всех экспериментах поддерживалась постоянной и составляла 21 °С. В качестве источника рентгеновского излучения была использована установка УРС-1,0 с молибденовым анодом при напряжении на трубке 50 кВ и токе 15 мА. Оценка мощности экспозиционной дозы излучения на расстоянии 10 см от источника составляла $P_{эксн} = 100$ кР/ч.

В ходе исследования элементного состава Zn-Ni покрытий из нейтрального электролита было обнаружено, что действие рентгеновского излучения на электролит приводит к увеличению содержания в сплаве никеля, который обладает более электроположительным потенциалом восстановления на катоде по сравнению с цинком. Так, для покрытий, сформированных в поле рентгеновского излучения, содержание никеля составляет 17 ат.%, а цинка – 83 ат.%. Для контрольных образцов данные значения составляют 14 ат.% и 86 ат.% соответственно. Это связано с тем, что под действием рентгеновского излучения, во-первых, изменяется рН электролита [4], а во-вторых, возникающие продукты радиолиза способствуют более полному связыванию ионов никеля в аммиачные кластеры, так как в состав электролита входит хлорид аммония. Перечисленные факторы приводят к облегчению разряда никеля на катоде и соответствующему возрастанию его концентрации в сплаве.

Полученные данные элементного состава покрытий Zn-Ni позволили спрогнозировать составы цинкникелевых сплавов, осажденных при плотностях катодного тока от 1 до 2 А/дм² и режимах облучения от 0 до 100 кР/ч.

Прогнозирование проводилось по методу двухуровневого полного факторного эксперимента. Влияющими факторами являлись плотность катодного тока (j) и мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения ($P_{\text{эсп}}$). В качестве откликов рассматривалось содержание никеля в сплаве.

В ходе моделирования было найдено уравнение регрессии в виде полинома второй степени, согласно которому была построена зависимость содержания никеля в сплаве от плотности катодного тока и мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения (рис. 1).

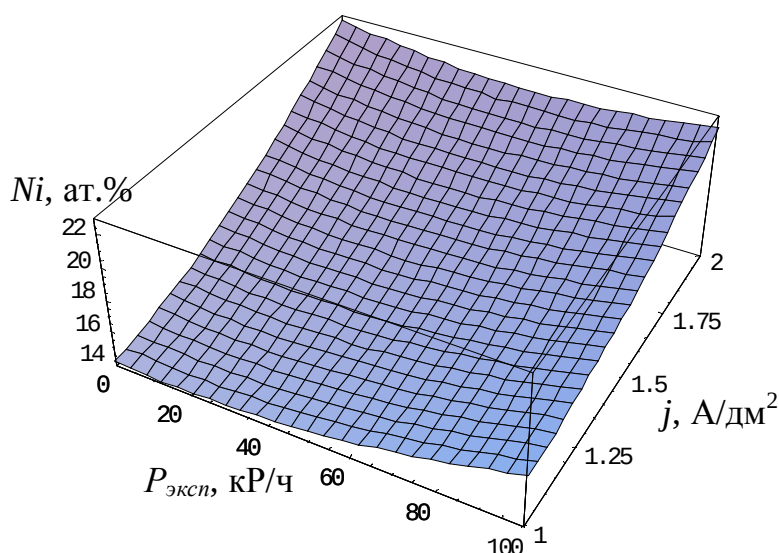


Рис. 1. Зависимость содержания никеля в сплаве Zn-Ni от плотности катодного тока и мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения

Видно, что с ростом катодного тока в исследуемом диапазоне происходит увеличение содержания никеля в сплаве. Это, очевидно, связано с тем, что т.к. никель более электроположительный металл по сравнению с цинком, то его комплексные соединения в электролите имеют большие константы устойчивости и обеспечивают большую поляризуемость, в результате чего с ростом плотности катодного тока осаждения потенциалы выделения цинка и никеля сближаются [5]. Вследствие этого происходит увеличение концентрации никеля в сплаве. Показано, что увеличение мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения, действующего в процессе электроосаждения, также приводит к возрастанию содержания

никеля в сплаве. Построенные зависимости позволяют вычислить содержание никеля в сплаве Zn-Ni при определенных значениях плотности катодного тока и дозы рентгеновского излучения внутри области планирования. Так, например, расчетное значение содержания никеля в сплаве при плотности тока 1 А/дм^2 для образца, полученного в условиях облучения рентгеновским излучением мощностью 60 кР/ч, составляет 14,9 ат.%. Экспериментальное значение содержания никеля в сплаве составляет 15,0 ат.%, что коррелирует с расчетным значением.

Таким образом, полученная математическая зависимость позволяет прогнозировать содержание никеля в сплаве Zn-Ni в области планирования и управлять элементным составом покрытий воздействием рентгеновского излучения определенной мощности экспозиционной дозы, не меняя состав электролита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамбург, Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю.Д. Гамбург. – М: Янус-К, 1997. – 384 с.
2. Электрокристаллизация Zn-Ni из сульфатных электролитов на индифферентных катодах в поле рентгеновского излучения / Анищик В.М. [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – №2. – С. 43 – 46.
3. Пикаев, А.К. Современная радиационная химия. Радиолит газы и жидкостей / А.К. Пикаев. – М.: Наука, 1986. – 439 с.
4. Спектры поглощения облученных водных растворов щелочно-галогенидных солей Анищик В.М. [и др.] // Вестник Гродн. гос. ун-та. Сер. 2. Математика. Физика. Техника. Информатика. Биология. Химия. Экология. – 2007. – №1. – С. 1 – 6.
5. Комплексные электролиты в гальванотехнике / Пурин Б.А. [и др.]. – Рига: Лиесма, 1978. – 265 с.

УДК 621.762

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А. А. Андрушевич, С. М. Ушеренко, Н. К. Толочко

***Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск***

Рассмотрены основы импульсной обработки литых материалов для получения повышенных механических свойств, связанных с изменением структуры, приведено обобщение экспериментальных и теоретических результатов по динамическому упрочнению литых деталей машин.

Традиционные методы получения литых деталей машин с последующим упрочнением пластической деформацией, термической обработкой во многих случаях являются недостаточными для обеспечения заданного комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств [1, 3, 4].

Высокие импульсные нагрузки приводят к реализации ряда необычных физических процессов. Если при статических процессах нагружения флуктуации энергии, давления, нагрева являются исключением, то в условиях динамических воздействий они постоянны. В материале образуются зоны со сложным напряженно-деформационным состоянием и формируются метастабильные структуры и соединения. Импульсное воздействие на металлы энергией взрыва приводит к изменению типа кристаллической структуры за счет динамического фазового перехода [1, 4]. Обнаружен и ряд других явлений, например, локальный разогрев, локальная деформация, наклеп и др. Их сочетание приводит к формированию различных структурных состояний с разными типами структур и, соответственно, комплексами физико-химических свойств [4].

Особый интерес представляют динамические изменения структур, приводящие к изменению свойств литых сплавов, которые определяются особенностями импульсного воздействия – местным разогревом, локальной деформацией, удельной энергоемкостью процесса, его кратковременностью.

Процессы, определяющие литейно-металлургический передел и импульсную обработку заготовок, существенно отличаются друг от друга [5]. После импульсной обработки в металлах и сплавах проявляются эффекты наследственности, которые заключаются в сохранении возникших изменений в структуре и оказывают заметное влияние на механические свойства литых заготовок. Ее особенность состоит в том, что дефекты структуры требуют на образование более высоких значений энергии, чем при статическом нагружении. Плотность структурных дефектов (дислокаций) и твердость при упрочнении взрывом оказываются более высокими, чем при обычных методах обработки металлов давлением. Образование избыточного количества дефектов кристаллической структуры на определенном уровне способствует «динамическому упрочнению» [6]. В этом диапазоне дефектности может быть обеспечено комплексное повышение уровня свойств металлических сплавов, в частности, за счет создания множества плоскостей скольжения в высокотвердых включениях, упрочняющих сплавы, возможен скачкообразный рост пластичности.

Технология динамического упрочнения литейных сплавов в настоящее время практически не реализуется. Анализ литературных ис-

точников и имеющихся экспериментальных результатов показал, что изменение структуры и свойств литых металлов в режиме сверхглубокого проникания (СГП), позволяющем сочетать обработку ударными волнами и локальное легирование, является актуальным. Воздействие пакетов ударных волн на сплавы существенно меняет структуру литого металла на макро-, мезо- и микроуровнях, сложным образом отражается на его свойствах.

Показана возможность динамической перестройки структуры и изменения свойств изделий из литого алюминия и его сплавов (Al-12%Si, Al-12%Si-1%Fe). Качественное отличие импульсного воздействия в режиме СГП от динамического обжата зарядом взрывчатого вещества заключается в возникновении армирующей субструктуры, представляющей собой объемную сетку микрозон перестроенной структуры матричного литого материала. В этих зонах известные материалы приобретают существенно отличный от исходного комплекс физико-химических свойств.

В качестве основного параметра, определяющего упрочнение (повышение твердости), выделяют давление на фронте ударной волны [1, 3]. На поверхности детали наблюдается максимальное повышение твердости, затем резкий спад и медленное убывание. Характер распределения твердости по глубине, по-видимому, зависит от характера изменения давления пакета ударных волн. Пока давление достаточно для протекания динамического фазового перехода, наблюдаются высокие значения твердости, а при снижении давления их величина резко падает.

Установлены структурные изменения в литейном сплаве АК12, происходящие под воздействием импульсного нагружения в режиме СГП. Они заключаются в измельчении структурных составляющих, образовании деформированного поверхностного слоя, возникновении каналов с аморфизированной структурой вокруг них и наличии аморфных волокон, а также в бесструктурном строении поверхностей каналов и прилегающих областей, образовавшихся после прохождения частиц размерами 0,1 – 0,3 мкм.

Расчеты, проведенные по методике работы [7], показали, что при незначительном объеме внесенных дефектов объем измененной структуры сплава составляет 5 – 10 %. В диапазоне времени динамического нагружения могут образовываться новые фазы в приканальных зонах с плотностью, на 50 – 70 % меньшей, чем плотность исходной алюминиево-кремниевой матрицы. Теоретическое значение давления образования этих фаз составляет 1 – 6 ГПа.

Экспериментальные исследования установили, что значения твердости в упрочненных зонах сплава АК12 возрастают на 10 – 20 % на глубине проникания до 110 – 120 мм. Доля матричного материала, затронутого структурной перестройкой, составила 8 – 10 %.

Сопоставление различных схем динамического воздействия по степени влияния на механические свойства литейного сплава АК12 показало, что даже повышенные значения подводимой энергии при взрывной обработке по схеме всестороннего сжатия по сравнению с СГП (более чем в 10 раз) пластичность (относительное удлинение) сплава не увеличивают. При одинаковом изменении значений твердости и прочности импульсная обработка в режиме СГП позволила получить скачкообразное увеличение значения пластичности (в 3 – 5 раз) с уменьшенной на порядок величиной энергии, вводимой в металл. Эти результаты возможны только за счет реализации рассмотренного выше механизма динамической перестройки структуры.

Полученные данные соответствуют представлениям о возможности увеличения дефектности неметаллических высокотвердых армирующих фаз, повышения прочности и, соответственно, скачкообразного увеличения пластичности. При СГП за счет кумуляции энергии в границах раздела фаз процесс дробления (увеличения дефектности) высокотвердых фаз резко усиливается.

Динамическое упрочнение – повышение прочностных характеристик литых деталей, достигаемое при импульсной (взрывной) обработке и связанное с перестройкой структуры литых материалов, существенно зависит от ряда технологических параметров процесса.

Обобщение полученных результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов процессов импульсной обработки литых деталей позволило разработать технологические рекомендации по динамическому упрочнению.

Импульсная обработка приводит к изменению структуры и повышению механических характеристик свойств литых материалов – прочности и твердости на 15 – 40 % при различных схемах нагружения.

Наиболее эффективной является импульсная взрывная обработка в режиме СГП, сочетающая легирование сплава, локальное формирование отдельных зон с образованием аморфизированных структур, и как следствие, образование дисперсионно-упрочненного композиционного материала.

Диапазон импульсных нагружений, при которых происходит динамическая перестройка структуры литейных сплавов на основе алюминия, составляет 2,5 – 17,5 ГПа.

Время нагружения при импульсной обработке может варьироваться в диапазоне 10 – 400 мкс с возможным растяжением для обеспечения более полной перестройки структуры. Такое кратковременное воздействие не приводит к существенному нагреву заготовок и позволяет сохранить полученную структуру.

Для завершения процесса перестройки структуры и получения заданного уровня свойств матричного материала целесообразна комплексная обработка, включающая дополнительно термическую обработку заготовок, например, закалку и отпуск. Длительное тепловое воздействие позволяет управлять получаемыми структурами, а, следовательно, и свойствами литых изделий в требуемых диапазонах.

Импульсная обработка в режиме СГП характеризуется возможностью изменения в широком интервале химического и фракционного состава рабочего вещества, в том числе с использованием наноматериалов, скоростью его перемещения и размещения относительно обрабатываемых заготовок. Это дает возможность управлять изменением структуры как на заданной глубине, так и по сечению литой детали.

Динамическое упрочнение литых материалов, сопровождающееся повышением твердости, особенно поверхностных зон заготовки, отличается высокой производительностью (100 – 120 заготовок/час) и низкими материальными и энергетическими затратами на специальную оснастку и проведение процесса импульсной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас, А.А. Физика упрочнения и сварка взрывом / А.А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980, 220 с.
2. Деформация металлов взрывом / Крупин [и др.]. – М.: Металлургия, 197. – 155 с.
3. Ван Флек, Л. Теоретическое и прикладное материаловедение / Л. Ван Флек. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
4. Эпштейн, Г.Н. Строение металлов деформированных взрывом / Г.Н. Эпштейн. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
5. Андрушевич, А.А. Управление литой структурой алюминиевых сплавов при импульсной обработке / А.А. Андрушевич // Литейное производство. – 2001. – С. 12 – 14.
6. Ушеренко, С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов / С.М. Ушеренко. – Минск: НИИИП, 1998. – 210 с.
7. Ушеренко, С.М. Современное представление об эффекте сверхглубокого проникания / С.М. Ушеренко // ИФЖ. – 2002. – Т. 75. – № 3. – С. 183 – 198.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ КОЛЬЦЕВОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЧАСТИЦ В ПОТОК ПЛАЗМЫ

В. И. Кузьмин

Институт теоретической и прикладной механики

им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Н. А. Руденская, А. А. Михальченко, Е. В. Картаев

Технопарк БНТУ «Политехник», Минск

Н. В. Соколова

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Установлено влияние скорости частиц, подаваемых в плазменный поток, вида их ввода (точечный и кольцевой), материала основы (сталь, керамика) на структуру напыленных слоев, уровень их твердости и пластичности.

Основным способом подачи обрабатываемых дисперсных материалов в поток плазмы является точечный поперечный ввод [1, 2]. Такой способ транспортировки порошков вносит существенные возмущения в несущий поток. Возникающая при этом неоднородность полей температуры и скорости в струе плазмы приводит к появлению в ее сечениях частиц, имеющих существенные отличия по тепловой и кинетической энергии. Это значительно снижает качество покрытий. Кроме того, локальный точечный ввод характеризуется предельно низким КПД [3].

В данной работе для получения осесимметричного высокотемпературного гетерогенного потока использовали узел кольцевого ввода напыляемого порошкового материала. В этом случае осесимметричный радиально сходящийся поток частиц непосредственно за зоной анодной привязки дугового разряда позволяет существенно увеличить эффективность взаимодействия потока плазмы с обрабатываемым материалом.

В отличие от точечного ввода кольцевой ввод с газодинамической фокусировкой обеспечивает плотный осесимметричный гетерогенный поток. При оптимальном режиме все частицы порошка должны проходить через высокотемпературную и высокоскоростную приосевую область плазменной струи.

В качестве исходного порошка использовали оксид алюминия Al_2O_3 дисперсностью 40 мкм. Порошок наносили на стальные и керамические образцы, применяя при этом два вида ввода частиц в плазменный поток – точечный (режимы 3.1 – 3.3) и кольцевой (2.1 – 2.3) с различными режимными условиями (при переходе от режима 1 к режиму 3 повышали расход плазмообразующего газа).

Сравнительный металлографический анализ напыленных слоев показал, что покрытия характеризуются высоким качеством границы раздела с основным металлом (рис. 1), на границе раздела отсутствуют поры.

Структура полученных покрытий – двухслойный композит (см. рис. 1). Нижний слой композита белого цвета представляет собой подслоя в виде Ni-Al. Установлено, что при переходе от режима 2.1 до 2.3 прослеживается оплавление крупных включений и их деформация (рис. 2). Крупные включения подслоя в режимах 3.1 – 3.3 подвергаются оплавлению, а в режиме 3.2 еще и деформируются, но менее интенсивно, чем в режиме 2.3.

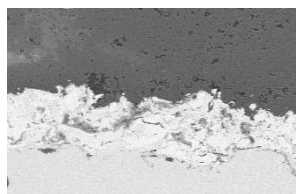


Рис. 1. Микроструктура покрытия – двухслойного композита, напыленного на стальную подложку ($\times 200$).

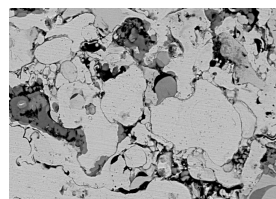
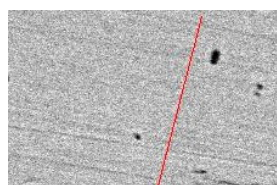


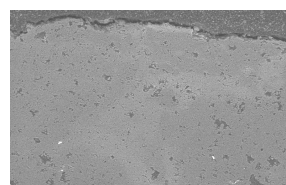
Рис. 2. Микроструктура подслоя ($\times 2000$)

Из этого явствует, что при кольцевом вводе порошка в плазменный поток оплавление с деформированием достигается при реализации режима 2.3. В случае точечного ввода напыляемых частиц похожее качество подслоя, но с меньшей деформацией крупных частиц, обеспечивается в режиме 3.2. Если учесть, что материал подслоя наносили в одном режиме с точечной подачей порошка в плазменный поток, то изменение структуры подслоя, зафиксированное на крупных включениях, обусловлено не чем иным, как воздействием керамических частиц основного слоя покрытия. Попадая в высокотемпературную зону струи и приобретая высокие скорости, частицы оксида алюминия способствуют нагреву материала подслоя и деформации отдельных включений.

Металлографическими исследованиями структуры основного (серого) слоя покрытий установлено, что это плотные (с пористостью менее 2 %), имеющие композиционное строение, слои (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура основного слоя покрытия : а – $\times 3000$, б – $\times 500$

При малом расходе плазмообразующего газа часть порошка транспортируется в низкотемпературные области плазменной струи, поэтому независимо от вида ввода частиц в плазменный поток на образцах, напыленных в режимах № 1, появляются продольные зоны несплавления, образование которых объясняется наличием недостаточно нагретых частиц.

Вид транспортировки частиц в плазменный поток оказывает влияние на форму и размеры зон несплавления: при точечном вводе порошков толщина таких зон в 3 – 4 раза больше, чем при кольцевом вводе. При режимных параметрах № 2 и № 3 описанные выше дефекты отсутствуют, покрытия характеризуются высоким качеством. Оптимальным по качеству и свойствам следует считать покрытие, полученное при режимных параметрах 2.2.

Композиционное строение верхней части – основного слоя покрытий заключается в следующем: в матричном материале равномерно распределены области в виде скоплений мелких включений. Самые крупные по размеру такие области расположены преимущественно вблизи границы основного слоя покрытий с подслоем; при переходе к свободной поверхности покрытий уменьшается их размер и количество. Здесь надо отметить, что минимальное количество областей скоплений мелких включений с минимальным их размером обнаружено при режиме 2.2.

В целом, именно при кольцевом вводе частиц в поток плазмы обнаружено меньшее количество таких областей. Во всех образцах мелкие включения в областях их скоплений характеризуются неправильной формой, при режиме 2.2. большая их часть оплавлена, что также свидетельствует о более высокой интенсивности нагрева подаваемых в плазму частиц порошка в условиях данного режима.

Микродюрометрические исследования показали, что в результате кольцевого ввода частиц в плазменный поток формируются более пластичные покрытия, так как только при режиме 2.3 зафиксировано появление незначительного количества микротрещин возле отпечатка индентора. Самое твердое и одновременно пластичное покрытие получено в режиме 2.2. Это можно объяснить более равномерным нагревом частиц в плазменном потоке, то есть более высокой вероятностью попадания их в центральную (высокотемпературную) зону струи.

Таким образом, оптимальным по параметрам нанесения покрытий является режим 2.2; именно в таких условиях сформировано покрытие на керамической подложке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Beretta F.E., Vassallo E. Design criteria for integrated injection systems in a d.c. plasma source / F.E. Beretta, E. Vassallo // Proc. 14th Int. Symposium on Plasma Chemistry. – Prague, Czech Republic, 1999. – Vol V. – P. 2429 – 2434.
2. Fauchais P. Understanding Plasma Spraying /P. Fauchais // J. Phys. D Appl. Phys., 2004. – 37(9). – P. 86 – 108.
3. Клубникин, В.С. Электротермические плазменные устройства и процессы напыления порошковых материалов: дисс. д-ра. техн. наук: 05.20.03 / В.С. Клубникин. – Ленинград, 1985. – 447 с.

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

С. В. Побережный, О. О. Кузнечик, В. В. Докторов, Г. А. Трубицин
Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск

Приведен сравнительный анализ перспективы применения электроимпульсного упрочнения твердосплавных материалов. Приведены результаты металлографических исследований упрочненного ВК6 и результаты сравнительных ресурсных испытаний шарошечного долота, изготовленного из упрочненного ВК6. Показано, что электроимпульсное упрочнение может увеличивать долговечность твердосплавного инструмента на 10 – 15 %.

Получаемый на основе карбида вольфрама твердосплавный инструмент широко применяется в машиностроении при обработке металлов резанием. Развитие и совершенствование технологий по изготовлению такого инструмента является актуальной задачей. Традиционными для порошковой металлургии технологиями получения твердосплавного инструмента считаются формование с использованием различных пластификаторов, отжиг и спекание [1 – 5]. При этом для повышения прочности твердосплавных материалов спекание может быть двухстадийным (сначала предварительное низкотемпературное, а затем окончательное высокотемпературное), проходящим в вакууме или с использованием защитной или окислительно-восстановительной атмосферы. В частности, для твердосплавных материалов, получаемых на основе карбида вольфрама, первая стадия спекания может происходить при температуре 700 – 1000 °С в водороде, благодаря чему обеспечивается удаление пластификатора и восстановление оксидов. Температура спекания на второй стадии определяется содержанием металлической (кобальтовой) фазы и в зависимости от этого устанавливается в пределах 1360 – 1480 °С [1 – 5]. Спекание осуществляется на печном оборудовании. Для обеспечения повышенной прочности твердосплавных материалов на этом оборудовании могут выполняться длительные и многоступенчатые циклы нагрева и отпуска [6 – 9]. Ограничением к количеству и длительности применения таких циклов является рекристаллизация твердой фазы, которая может привести к снижению прочности твердосплавного инструмента [9], а также энергозатраты, делающие этот инструмент неконкурентноспособным. Снять эти ограничения предлагается электроимпульсным методом, основанным на пропускании электроимпульсного тока через предварительно спеченный твердосплавный материал. С учетом этого с использованием давления порядка 100 МПа и низковольтного (до 10 В) тока промышленной частоты проведены исследования по элек-

троимпульсному упрочнению спеченного твердосплавного материала ВК6 (ГОСТ 3882-74). Полученные с помощью микроскопа «МЕТАМ РВ-21» результаты металлографических исследований (рис. 1) показали, что электроимпульсная обработка позволяет сохранять практически неизменными размеры зерен исходного материала.

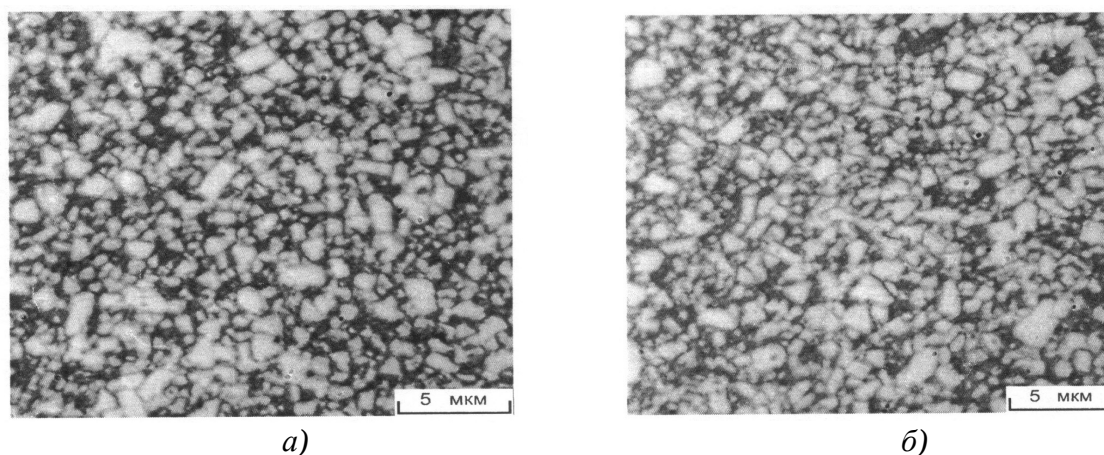


Рис. 1. Микроструктура твердосплавного материала ВК6:
а – до электроимпульсной обработки; б – после электроимпульсной обработки

Ресурсные испытания, проведенные на СП «Букар», показали, что электроимпульсная обработка на установленных режимах шарошечного долота, изготовленного из твердосплавного материала ВК6, способствует повышению его долговечности на 10 – 15 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стельмах, Е. Россия на мировом рынке металлообрабатывающего инструмента. // Металлоторговля: ВАО «Разноимпорт». – 2009. – Сентябрь. – С. 29 – 34.
2. Панов, В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: учеб. пособие для вузов / В.С. Панов, А.М. Чувиллин. – М.: МИСИС, 2001. – 428 с.
3. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учеб. пособие для вузов. / В.Н. Анцифоров и [др.]. – М.: Металлургия, 1987 – 792 с.
4. Лошак, М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. // М.Г. Лошак. – Киев: Наукова думка, 1984. – 84 с.
5. Третьяков, В.И. Основы металловедения и технология производства спеченных твердых сплавов / В.И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 283 с.
6. Муха, И.М. Влияние скорости охлаждения на качество твердых сплавов / И.М. Муха // Порошковая металлургия. – 1971. – №5. – С. 22 – 27.
7. Лошак, М.Г. Упрочнение твердых сплавов / М.Г. Лошак, Л.И. Александрова. – Киев: Наукова думка, 1977. – 147 с.
8. Туманов, В.И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама – кобальт / В.И. Туманов. – М.: Металлургия, 1971. – 95 с.
9. О влиянии термической обработки на прочность твердого сплава ВК15 / М.Г. Лошак [и др.] // Горный породоразрушающий инструмент. – Киев: Техника, 1970. – С. 64 – 72.

УПРОЧНЕНИЕ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Т. В. Вигерина

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Приведены результаты исследований по упрочнению шеек коленчатых валов автотракторных двигателей поверхностным пластическим деформированием. Обоснованы оптимальные режимы процесса после наплавки шеек валов наплавкой в среде защитных газов.

В практике ремонтного производства существует проблема, возникающая при восстановлении стальных коленчатых валов автотракторных двигателей наплавкой, обусловленная возникновением остаточных напряжений в наносимом покрытии и, как следствие, снижением усталостной прочности восстановленных шеек валов на 25 – 30 % [1].

Наплавка в большинстве случаев позволяет получить покрытия, характеризующиеся высокой износостойкостью. Для того чтобы достичь значений предела выносливости, не уступающего пределу выносливости новых валов, в технологический процесс восстановления вводят термическую операцию, которая способствует снятию внутренних напряжений, улучшает механические свойства наплавленного материала и зоны термической усталости. Основным недостатком этой операции является высокая энергоемкость. Отрицательное влияние наплавки на структуру получаемых износостойких покрытий так же можно значительно снизить, применяя после наплавки их поверхностное пластическое деформирование (ППД) [2].

Обкаточный ролик упрочняющего устройства под влиянием усилия прижима, действующего в обрабатывающей системе, вызывает в зоне контакта с обрабатываемой заготовкой местную как упругую, так и пластическую деформации. Из-за большой твердости обрабатываемого инструмента деформации имеют место в поверхностном слое покрытия. В результате деформации происходит изменение исходной формы и ориентации зерен. Они подвергаются сплющиванию и вытягиванию в направлении максимальной деформации с анизотропией механических свойств, происходит также изменение ориентации структурных составляющих вдоль обрабатываемой поверхности под влиянием контактного давления. Размеры зерен уменьшаются в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности и увеличиваются в направлении, совпадающем с направлением поверхностной пластической обработки [3]. Пластическая деформация распространяется от поверхности детали на глубину, зависящую от пластических свойств материала и усилия деформирования. Зависимость толщины де-

формированного слоя от усилия прижатия ролика носит нелинейный характер (рис. 1).

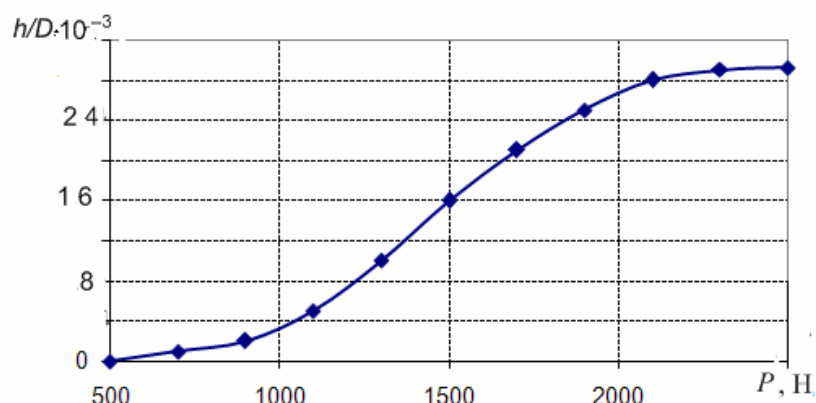


Рис. 1. Зависимость относительной глубины пластической деформации h/D от усилия прижатия обкаточного ролика P

При усилии деформирования 500 – 1000 Н относительная глубина пластической деформации (h/D , где h – глубина пластической деформации; D – диаметр обкаточного ролика) с увеличением усилия прижатия ролика изменяется незначительно от $1 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$, что объясняется преимущественно смятием микронеровностей. При усилии 1000 – 2000 Н зависимость носит примерно линейный характер (относительная глубина пластической деформации от $3 \cdot 10^{-3}$ до $26 \cdot 10^{-3}$), т. е. с увеличением усилия прижатия ролика пропорционально ему увеличивается и толщина деформированного слоя. Если усилие превышает 2000 Н, то с его увеличением относительная глубина деформации практически не изменяется $\sim 28 \cdot 10^{-3}$, так как верхний слой материала имеет ограниченную способность к аккумуляции энергии деформирования и по мере последовательной деформации наступает состояние энергетического насыщения. Дальнейшее увеличение усилия или количества проходов при поверхностной пластической обработке может привести к отслоению поверхности.

Упрочнение материала при деформировании объясняет дислокационная теория, из которой следует, что дислокации концентрируются возле линий скольжения. Около дислокаций образуются поля напряжений, поэтому для дальнейшего их распространения необходимо приложение большего усилия по сравнению с неупрочненным материалом. Перемещающиеся дислокации задерживаются, если встречают на своем пути препятствия в виде других дислокаций, границ зерен или стенок кристаллов, что обуславливает повышение усталостной прочности после ППД.

Способность материала к деформационному упрочнению зависит в большой степени от его состава и структуры. С увеличением содержания углерода в сталях пропорционально снижается и прирост твердости, не-

смотря на повышение усилия прижатия инструмента к заготовке. Микроструктура покрытия, полученная наплавкой проволоки Св-08Х13, представляет собой ферритно-мартенситную структуру с мелкодисперсными включениями карбидов металлов. Сплавы с подобной структурой и низким содержанием углерода имеют способность к значительным увеличениям твердости, прочности и износостойкости в результате наклепа (при пластическом деформировании со значительной степенью деформации). В результате ППД в поверхностном слое наплавленного покрытия образуется текстура с повышенной концентрацией дефектов кристаллической решетки $0,71 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Также после ППД в покрытии возникают внутренние остаточные напряжения сжатия, которые блокируют раскрытие усталостных трещин, превращая их в нераспространяющиеся. Изменение ориентации структурных составляющих вдоль обрабатываемой поверхности под влиянием контактного давления, препятствующее росту усталостных трещин, в основном радиально ориентированных, объясняет повышение усталостной прочности ППД.

Введение в технологию восстановления валов наплавкой проволокой Св-08Х13 операции поверхностного пластического деформирования обкаточным роликом с силой его прижатия ролика 2900 Н повышает предел выносливости восстановленных валов на 25 – 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 345 с.
2. Кравчук, В. С. Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций / В. С. Кравчук, Абу Айаш Юсеф, А. В. Кравчук. – Одесса: Астропринт, 2000. – 160 с.
3. Пшибыльский, В. В. Технология поверхностной пластической обработки / В. В. Пшибыльский. – М.: Металлургия, 1991. – 479 с.

УДК 621-752(031):62.19

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Н. Н. Ишин, А. М. Гоман, В. И. Адашкевич,
А. С. Скороходов, М. К. Натурьева**

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Предложена методология оценки технического состояния редукторных систем мобильных машин, базирующаяся на мониторинге их вибрационных характеристик в процессе эксплуатации.

Переход от планово-предупредительной системы обслуживания оборудования и машин к обслуживанию по их фактическому состоянию является одним из путей сокращения непроизводительных расходов при эксплуатации изделий машиностроения. Поэтому разработка эффективных методико-инструментальных средств оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса машин и механизмов является одной из приоритетных задач современного машиностроения.

Прогнозирование остаточного ресурса включает целый комплекс задач: диагностирование объекта, прогнозирование развития этого состояния в процессе эксплуатации и информирование персонала, обслуживающего объект, на основе этого прогноза рекомендациями об остаточном сроке службы. Наиболее перспективным методом безразборной диагностики технического состояния трансмиссионных систем является контроль их динамических характеристик путем постоянного или периодического мониторинга вибрационных параметров.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, в ходе выполнения заданий ГПНИ «Механика», «Техническая диагностика», ГНТП «Машиностроение» разработаны методология и инструментальные средства оценки технического состояния и вибромониторинга трансмиссионных узлов мобильной техники, позволяющие прогнозировать их остаточный ресурс. Существенным отличием предложенных подходов от известных, является возможность оценки технического состояния трансмиссионных систем мобильных машин в условиях их работы при переменных нагрузках и скоростях движения. Разработанные методические подходы базируются на анализе расчетно-экспериментальных диагностических моделей механизма, связывающих уровень предельных вибраций узла со степенью и накоплением повреждений его элементов в эксплуатации.

Износ и контактное выкрашивание изменяют шаг зацепления зубчатой передачи и величины контактных площадок, усталостные трещины – жесткость зацепления, что приводит к изменению динамических составляющих нагрузки в зубчатом зацеплении. В свою очередь величина динамической нагрузки определяет уровень виброакустической активности зубчатой передачи, позволяющий установить взаимосвязь динамической составляющей нагрузки с параметрами вибраций, и, далее, со степенью износа и контактного выкрашивания отдельных пар зубьев, а также появлением усталостных трещин у ножек зубьев.

Таким образом, представляется возможным, установив корреляционную связь между параметрами износа (контактного выкрашивания) и изменением величины динамической составляющей нагрузки в зацеплении

от наработки, оцениваемой путем контроля величины генерируемых зубьями в процессе пересопряжения вибраций, создать методику оценки текущего технического состояния и остаточного ресурса зубчатых механизмов по изменению их динамических параметров.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы при создании методических и инструментальных средств вибромониторинга редукторов мотор-колес (РМК) большегрузных самосвалов БелАЗ в их карьерной эксплуатации (рис. 1). Разработка аппаратурной части системы вибромониторинга редукторов мотор-колес основывалась на методике и алгоритмах, охватывающих ключевые моменты технологии диагностирования редукторных систем данного типа и непосредственно обеспечивающих сбор, обработку и выдачу информации о степени опасности диагностируемых состояний [1].



Рис. 1. Бортовая система вибромониторинга и диагностики РМК самосвала БелАЗ

Возможности системы для обнаружения дефектов элементов редуктора путем определения наличия существенных изменений в гармонических спектрах РМК при повреждении зубчатого колеса проиллюстрированы на рисунке 2. С этой целью в редукторе была проведена замена коронной шестерни ($z = 117$) на дефектную, имеющую скол зуба, и проанализированы спектры виброускорений в четырех контрольных точках РМК до и после проведения замены.

Во всех контрольных точках и на разных скоростных режимах на зубцовой частоте наблюдается более чем в два раза превышение уровня вибраций редуктора с дефектным колесом над уровнем вибраций бездефектного редуктора.

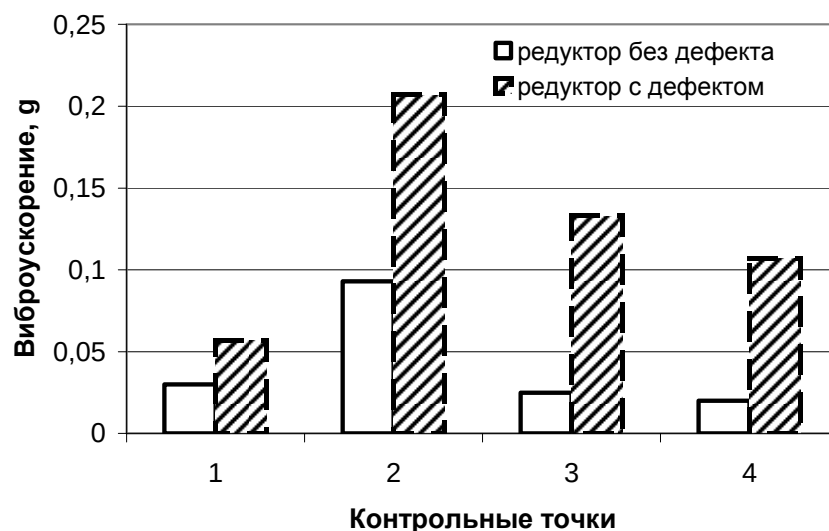


Рис. 2. Амплитуда виброускорений на зубцовой частоте в контрольных точках редуктора без дефекта и с дефектом при частоте вращения входного вала 600 мин^{-1}

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что выбранные в качестве критериев оценки технического состояния элементов редуктора параметры вибраций однозначно зависят от состояния зубчатых колес и могут быть использованы (при наличии статистической базы данных по предельным уровням вибраций для каждой шестерни редуктора) для диагностирования РМК при эксплуатации самосвала.

Созданные методология и инструментальные средства безразборной оценки технического состояния трансмиссионных узлов машин предназначены для своевременного предупреждения в условиях эксплуатации машины о предаварийном состоянии зубчатых приводных механизмов трансмиссионных систем для исключения ситуаций, связанных с аварийным отказом автомобиля. Применение бортовой системы вибромониторинга обеспечит повышение сроков службы и эксплуатационной готовности техники, переход от планово-предупредительного обслуживания машин к обслуживанию по фактическому состоянию, снижение времени простоя автомобильной техники, сокращение затрат на их обслуживание и ремонт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ишин, Н. Н. Вибромониторинг остаточного ресурса зубчатых передач / Н. Н.Ишин, А. М.Гоман, А. С.Скорыходов // Вестник БрГТУ.Машиностроение. – 2008. – №4(52) – С. 52 – 58.

ФОРМИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИЕЙ

П. Г. Сухоцкий, В. К. Шелег

Белорусский национальный технический университет, Минск

М. А. Белоцерковский

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Предложены способы формирования стальных износостойких покрытий газопламенным напылением с ультразвуковой активацией.

Одними из наиболее эффективных методов восстановления, упрочнения и защиты быстроизнашивающихся деталей машин и элементов конструкций зарекомендовали себя технологии, основанные на распылении проволоочных материалов. Там, где не требуется наносить слои из керамики, жаропрочных композитов, а восстановлению подлежат детали из сталей, чугунов, цветных металлов и их сплавов, то есть деталей машин и механизмов общемашиностроительного профиля, рационально использовать газопламенное напыление (ГПН) проволоки. Это относится, прежде всего, к реставрации и упрочнению деталей узлов трения (осей валиков, коленчатых валов, подшипников скольжения, направляющих) и посадочных мест под подшипники в корпусах и на валах.

В результате исследований, ранее проведенных в Объединенном институте машиностроения, отмечено аномально высокое количество аустенита в газопламенных покрытиях, напыленных проволоками из сталей мартенситного класса. Авторами данной работы было предположено, что термическая стабилизация аустенита в покрытиях существенно зависит от размера распыляемых частиц стальных проволок всех классов. При этом для сталей мартенситного класса эта зависимость выражена сильнее, чем для инструментальных сталей, а для конструкционных рессорно-пружинных сталей она минимальна.

Для оценки влияния размеров распыляемых частиц на количество метастабильного аустенита в покрытиях при распылении сталей мартенситного класса были проведены исследования на установках электрометаллизации ЭМ-14, гиперзвуковой металлизации АДМ-10, газопламенного проволоочного напыления МГИ-4П и газопламенного проволоочного напыления «ТЕРКО-2». В комплектацию термораспылителя «ТЕРКО-2» входит помимо обычной распылительной головки также головка, снабженная га-

зоструйным излучателем типа Гартмана, генерирующим в распыляющей воздушной струе высокочастотные акустические колебания (≈ 30 кГц) с уровнем звукового давления до 130 дБ. Факел пламени формировался горением пропан-кислородной смеси. В качестве распыляемого материала была выбрана проволока из «классической» стали мартенситного класса марки 40Х13. Режимы напыления покрытий соответствовали паспортным данным установок, рекомендуемым для формирования покрытий из стальных проволок. В учитываемый размер распыленных частиц входили близкие по диаметру частицы, составлявшие не менее 75 % от общего количества. Содержание остаточного аустенита в напыленных покрытиях определялось методом рентгеноструктурного анализа (дифрактометр ДРОН-3,0 монохроматизированное $\text{CoK}\alpha$ излучение). Результаты приведены в таблице.

Таблица

Размер распыленных частиц и содержание остаточного аустенита в покрытиях

Метод напыления и используемое оборудование	Состав распыляющей струи и температура нагрева, К	Размер частиц, мкм	Количество остаточного аустенита, об. %
Электрометаллизация, ЭМ-14	воздух 2450 – 2650	55 – 80	12 – 16
Гиперзвуковая металлизация, АДМ-10	пропан – воздух 2500 – 2650	3 – 20	10 – 14
Газопламенное напыление, МГИ -4П	пропан – кислород 1760 – 1800	60 – 90	20 – 24
Активированное газопламенное напыление, «ТЕРКО-2»	пропан – кислород 1760 – 1800	5 – 30	42 – 49

Данные, приведенные в таблице свидетельствуют о том, что на количество остаточного аустенита влияет не только температура нагрева, но для сталей мартенситного класса в большей степени оказывает влияние размер распыленных частиц.

С целью определения оптимального диапазона размеров частиц, распыленных проволок мартенситного класса 40Х13, использовали установку «ТЕРКО-2» с распылительными головками, снабженными ультразвуковым активатором и без него. Анализ полученных результатов показывает, что для получения в покрытии из сталей мартенситного класса максимально возможного количества остаточного аустенита (более 40 об.%) необходимо покрытие формировать частицами размером от 5 до 25 мкм. Частицы размером менее 5 мкм интенсивно окисляются с образованием FeO и Fe_2O_3 , поэтому количество аустенита резко снижается. Увеличение размера частиц более 25 мкм изменяет процессы теплопереноса и характер термической стабилизации аустенита.

Исследование дюрометрических характеристик покрытий из стали 40Х13 после их контакта в течение 5...35 минут при удельной нагрузке 3 МПа в режиме сухого трения со сталью 65Г показало, что деформационное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение у покрытий, полученных при акустическом активировании, протекает гораздо более интенсивней, и достигаемые значения твердости выше в 1,5 раза, чем у покрытий, полученных традиционным ГПН.

Таким образом, акустическое активирование процесса распыления проволок из сталей мартенситного класса позволяет увеличить содержание остаточного аустенита в покрытиях до 50 об.%, что обуславливает возможность их упрочнения в процессах трения или механической обработки с повышением твердости от 250 до 750 HV.

УДК 621.771.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИЕЙ

П. Г. Сухоцкий, В. К. Шелег

Белорусский национальный технический университет, Минск

М. А. Леванцевич

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований амплитуды колебаний проволоки, оказывающей существенное влияние на диспергирование напыляемых частиц, при газопламенном напылении с ультразвуковой активацией. Показано, что с увеличением уровня звукового давления наблюдается рост амплитуды колебаний проволоки, однако до определенных пределов, после, которых, амплитуды колебаний стабилизируется. При этом на величину амплитудных значений колебаний существенное влияние оказывает вид материала проволоки и ее диаметр.

Одним из путей улучшения качества защитных покрытий, формируемых при газопламенном напылении порошковых и проволочных материалов, является использование энергии ультразвуковых колебаний, подводимых как к подложке, так и к распыляемому материалу [1 – 3]. Благодаря этому повышается дисперсность напыляемых частиц, увеличивается их прочность сцепления с основой и значительно снижается пористость сформированных покрытий. При этом для возбуждения подобных колебаний используют стационарные ультразвуковые излучатели, эксплуатация которых возможна только в специализированных помещениях, что создает

определенные трудности при их применении в условиях действующего производства. Этих недостатков лишен газопламенный распылитель, в котором ультразвуковые колебания генерируются струей воздушного потока, подаваемого в его сопло, с высоким уровнем звукового давления [4]. Указанный распылитель выгодно отличается от известных простотой в эксплуатации и возможностью автономной работы без применения сложного дорогостоящего оборудования. Однако отсутствие данных о влиянии параметров воздушного потока на амплитуду колебаний распыляемой проволоки препятствует выбору рациональных режимов формирования покрытий.

Цель исследований заключалась в изучении влияния уровня звукового давления воздуха, подаваемого в сопло газопламенного распылителя, на амплитуду колебаний проволоки в зависимости от ее диаметра и вида материала.

Методика исследований заключалась в измерении амплитуды колебаний конца проволоки в зависимости от уровня звукового давления воздуха выполняли на испытательном стенде, представленном на рисунке 1.

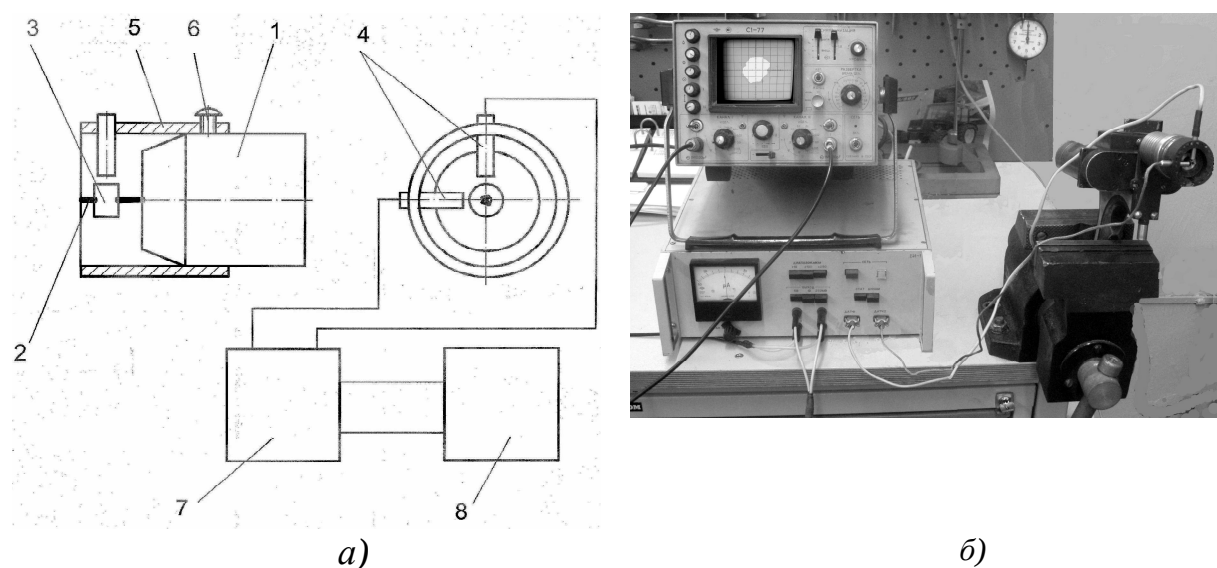


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) измерительного комплекса для оценки амплитуды колебаний проволоки по траектории ее движения: 1 – сопло; 2 – распыляемая проволока; 3 – кольцо; 4 – бесконтактные индуктивные датчики; 5 – оправка; 6 – винт; 7 – измерительный прибор БИ-1; 8 – двухканальный электронно-лучевой осциллограф С1-77

В сопле распылителя 1, зафиксирована распыляемая проволока 2, с наклеенным кольцом 3, относительно которого установлены под углом 90^0 друг относительно друга два бесконтактных индуктивных датчика 4, смонтированные в оправке 5, закрепленной на сопле 1 посредством винта 6. Датчики 4 соединены с измерительным прибором 7, к выводам которого

подключен двухканальный электронно-лучевой осциллограф 8. Сменные кольца 3 изготавливались из алюминиевого сплава Д16 и представляли собой втулки длиной 5 мм, с наружным диаметром 5,5 мм. Их внутренний диаметр соответствовал диаметрам исследуемых проволок в диапазоне от 1,8 до 3,0 мм.

В качестве измерительного прибора использовался модернизированный прибор БИ-1, разработанный в ОИМ НАН Беларуси.

Оценку амплитуды колебаний конца проволоки в зависимости от уровня звукового давления воздуха, подаваемого в распылитель, проводили по траектории ее движения в плоскости, перпендикулярной ее оси, регистрируемой на экране электронно-лучевого осциллографа. Перед началом измерений производилась тарировка преобразователей, после чего их устанавливали посредством специальной оправки на корпусе головки распылителя с зазором 0,3...0,5 мм относительно поверхности кольца, закрепленного на проволоке, под углом 90° с угловой погрешностью $\pm 2^\circ$.

Измерения амплитуды колебаний проволоки проводили в отсутствие факела пламени и распыления проволоки. Воздух подавали в распылительное устройство с варьированием давления и расхода, что способствовало генерированию ультразвуковых колебаний проволоки с изменяющейся амплитудой, регистрируемой посредством бесконтактных индуктивных датчиков и прибора БИ-1 на экране электронно-лучевого осциллографа в виде траектории (фигуры Лисажу).

В качестве примера на рисунке 2 представлены фотографии траекторий движения конца проволоки без активации и с ультразвуковой активацией.

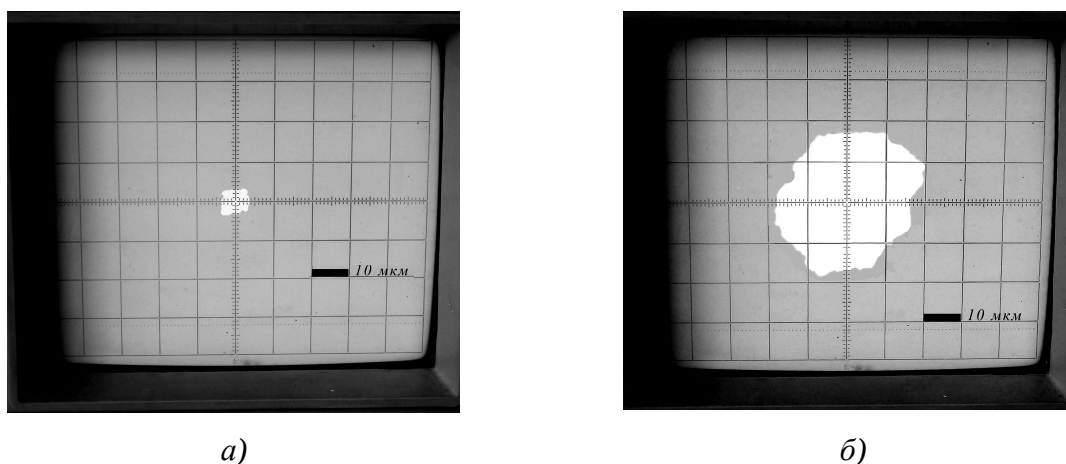


Рис. 2. Фотографии траектории колебаний конца проволоки в газопламенном распылителе: а) без активации; б) с ультразвуковой активацией

В ходе выполненных исследований было установлено, что с ростом уровня звукового давления амплитуда колебаний конца проволоки увели-

чивается (рис. 3), однако, до определенных пределов, после, которых, дальнейшее увеличение уровня звукового давления не приводит к росту амплитуды колебаний. При этом на амплитудные значения колебаний существенное влияние оказывает диаметр и вид материала проволоки. С увеличением диаметра амплитуда колебаний проволоки уменьшается. Материал проволоки, имеющий сравнительно не высокий модуль упругости, также способствует снижению амплитуды колебаний.

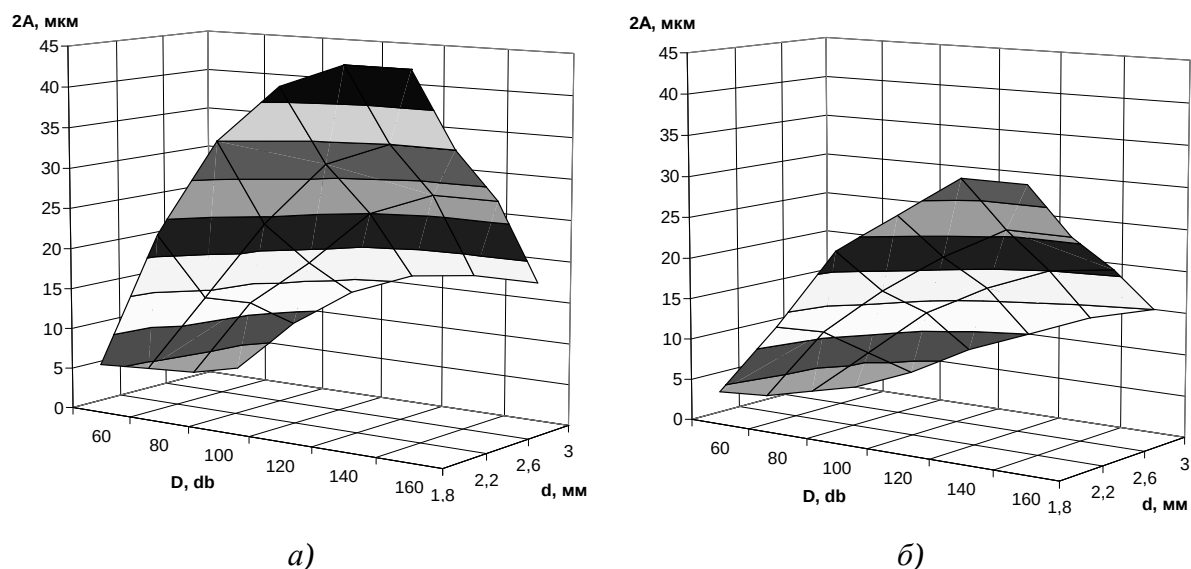


Рис. 3. Влияние уровня звукового давления и диаметра проволоки на амплитуду колебаний конца проволоки в газопламенном распылителе:

а) из стали 40X13 (ГОСТ 18143-72) б) бронзы БрКМЦ 3-1 (ГОСТ 5222-72)

ЛИТЕРАТУРА

1. Ангелов, Г. С. Применение ультразвука в промышленности / Г. С. Ангелов, И. Н. Ермолов и [др.]. – М.: Машиностроение, 1985г. – 240 с.
2. Способ нанесения антикоррозионных покрытий: пат. 2109841 RU МПК С 23 С 4/00 / В. И Шевелкин, О. Б. Шуляковский, В. П. Булатов; заявитель Шевелкин В.И.. - №97113405/02; заявл. 13.08.1997; опубл. 27.04.98
3. Способ плазменного напыления покрытий Пат. 2283364 RU МПК С 23 4/12 / Бекренев Н.В, Лясников В.Н., Трофимов Д.В.; заявитель ГУВПО Саратовский Государственный Технический Университет – №2004132666/02; заявл. 09.11.2004; опубл. 10.09.2006 // бюл. №25
4. Способ газопламенного напыления покрытий из проволоочных материалов: пат. 5768 Респ. Беларусь, МПК В 7/20 / П. А. Витязь, М. А. Белоцерковский, Ю. В. Полупан, П. Г. Сухоцкий; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – №а 2000051; заявл. 02.06.00; опубл. 30.12.03 // Афiцыйны бюл. / Нацыянальны цэнтр iнтэлектуал. уласнасцi. – 2003. – № 4. – С. 122.
5. Агейкин, Д. И. Датчики контроля и регулирования: Справочные материалы / Д. И. Агейкин, Е. Н. Костина, Н. Н. Кузнецова. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛООТХОДОВ

О. П. Штемпель, В. А. Фруцкий

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

В работе представлены наиболее общие выводы по вопросам получения композиционных материалов в подвижных порошковых смесях для последующего напыления.

Представляется перспективным создание гетерогенного материала, способного работать при различном характере приложенных нагрузок. За основу можно принять чугунную стружку. Для придания повышенной стойкости необходимо ввести в состав материала элемент, повышающий твердость. Для возможности применения в подшипниках в условиях трения скольжения материал должен содержать элементы, повышающие антифрикционность. Представляется возможное решение этой проблемы путем создания композиционных материалов с основой из чугунной стружки и диффузионно введенных меди и бора.

Диффузионное легирование металлических порошков и образцов проводили в лабораторных условиях по методикам [1].

Предыдущими исследованиями было выяснено что, при борировании в подвижных смесях [2] можно выделить следующие особенности стадий процесса:

- вследствие циклического характера протекания деформационно-рекристаллизационных процессов на поверхности частиц чугуна идет интенсификация всех диффузионных процессов, в том числе и интенсификация адсорбирования атомов бора в поверхностные слои чугунных частиц;
- процессы тепломассопереноса под воздействием движущихся частиц способствуют интенсификации сорбционных процессов на поверхности чугунных частиц;
- значительная интенсификация диффузионных процессов приводит к смене лимитирующей стадии процесса диффузионного легирования [3];
- лимитирующей стадией процесса диффузионного легирования становятся сорбционные процессы на поверхности чугунных частиц.

Для простого меднения можно выделить следующие особенности процесса:

- температура в реакционном объеме близка к температуре плавления меди, вследствие этого повышается ее пластичность (значение предела текучести меди близко к нулю);

- при наличии деформационных процессов частицы меди стремятся закрепиться на поверхности частиц чугуна и «намазаться».

Однако при простом меднении «активного» схватывания между частицами чугуна и меди не происходит, наблюдаются его единичные случаи, что объясняется, вероятно, наличием барьерных оксидных пленок на поверхностях частиц смеси. Без восстановительной среды в реакционном объеме удаления оксидных пленок «царапанием» частиц в процессе обработки в подвижной смеси не происходит.

При исследовании омеднения частиц чугуна с участием бора было установлено что, наличие атомарного бора в реакционном объеме, ведет к предотвращению окисления частиц меди и чугуна по поверхности, а также к восстановлению уже имеющихся оксидных пленок. Это, в свою очередь, ведет к образованию поверхностей близких по своим свойствам к ювенильным. Боридный же слой, образующийся на чугунной частице, повышает твердость поверхностного слоя. Эти факторы способствуют тому, что при перемешивании подвижной смеси и возникновении деформаций частиц чугуна медные частицы закрепляются на неровностях поверхностей чугунных частиц. В дальнейшем при интенсивном движении частиц при повышенной температуре происходит размазывание закрепившихся частиц по поверхности чугунной частицы (рис.1).

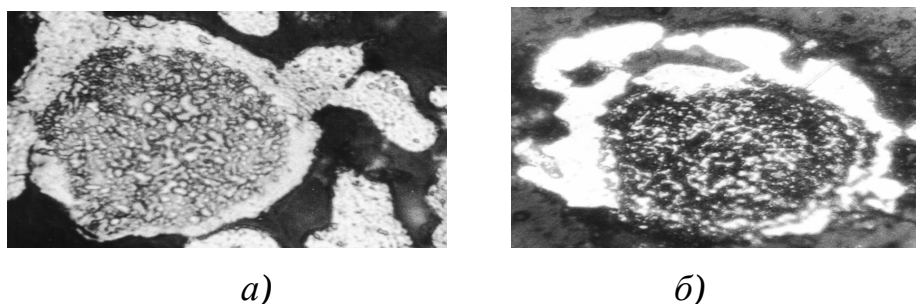


Рис. 1. Стадии диффузионного легирования медью стружки чугуна СЧ 20: а) припекание медных микрочастиц к поверхности стружки ($\times 1000$); б) распределение меди по поверхности стружки ($\times 500$)

В ходе экспериментов было отмечено, что припекание (схватывание) медных частиц к чугунным происходило только при наличии бора в насыщающей смеси. Это связано с тем, что медь мало (до 0,1% массы) растворяется в железе. Таким образом, формируется композиционная частица,

имеющая боридную оболочку с припеченными к ней частицами меди. В ряде случаев образуются структуры с медными участками в боридном слое.

Таким образом, при диффузионном легировании металлических порошков на железной основе в подвижных порошковых смесях бором с медью в поверхностных слоях частиц подвижной смеси в процессе обработки протекают следующие процессы: пластического деформирования, рекристаллизации, полигонизации, диффузии, перемешивания атомов, которые приводят к ускорению диффузии атомов легирующих элементов как в тело частиц так и в реакционный объем контейнера.

При диффузионном легировании металлических порошков на основе железа в подвижных порошковых смесях с участием бора происходит значительная интенсификация процесса, которую можно объяснить влиянием следующих факторов:

- интенсификация процесса образования атомарного бора вследствие циклической пластического деформирования частиц насыщающей смеси (первая элементарная стадия диффузионного легирования);
- интенсификация процессов тепломассообмена вследствие постоянного движения и контактирования частиц смеси между собой в процессе обработки (вторая и третья элементарные стадии диффузионного легирования);
- интенсификация диффузионного массопереноса циклическим протеканием деформационно-рекристаллизационных процессов в поверхностных слоях частиц насыщаемых порошков в процессе обработки.

При диффузионном легировании металлических порошков в подвижных смесях лимитирующей элементарной стадией процесса становятся сорбционные процессы на поверхности обрабатываемых частиц.

При диффузионном легировании металлических порошков на основе железа в подвижных порошковых смесях медью и бором одновременно происходит образование боридных диффузионных слоев с интенсивным припеканием к ним частиц меди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко, Ф. И. Особенности диффузионных процессов при борировании стальных порошков / Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов // Изв. Акад. наук Беларуси, сер. физ.-техн. наук, – 1997, – № 1, С. 8 – 11.
2. Грузин, П. Л. О влиянии специфики диффузионных процессов на диффузионное насыщение поликристаллических материалов / П. Л. Грузин, С. В. Земский // Защитные покрытия на металлах. – Вып. 5. – 1971. – С. 17 – 23.
3. Ворошнин, Л. Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ТВЕРДОЙ СМАЗКИ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко
Белорусский национальный технический университет, Минск

Описана технология получения композиционного керамического материала. Получены порошки оксидной керамики с введением плакированной твердой смазки. Проведено исследование свойств и структуры композиционного материала на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки.

Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлены необходимостью улучшения свойств износостойких плазменных покрытий, так как, в отличие от механических смесей порошков, только в композиционных порошках могут одновременно находиться в заданном состоянии разнородные по физическому и химическому составу вещества, элементы, соединения, что дает возможность достигать новых эффектов при использовании таких материалов для нанесения покрытий. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий.

Твердые смазки подвержены интенсивному разложению во время напыления, поэтому их необходимо плакировать оболочками из металла (например, никелем), стабилизирующими состав частиц в период высокотемпературного распыления и создающими предпосылки генерирования прочных связей между частицами и подложкой при формировании газотермических покрытий. Вместе с тем, упомянутые оболочки в структуре покрытий выполняют роль теплозащитных экранов, которые затрудняют передачу тепла в нанесенных материалах. Низкая теплопроводность оболочек из никеля связана с тугоплавкими фазами оксидов никеля. Ухудшение передачи тепла в напыленных материалах с плакирующими оболочками частиц, способствует удержанию тепловой энергии в нагреваемом слое покрытия при напылении, степень оплавления которого возрастает. При этом улучшаются условия для уплотнения напыленного материала, увеличивается также количество центров кристаллизации расплава с конкурирующим развитием кристаллических зерен при сверхбыстром охлаждении жидкофазного материала. Взаимный контакт увеличивающихся кристал-

лических зерен существенно ограничивает их развитие и размеры, создаются условия для получения измельченной нанокристаллической структуры. Таким образом, ухудшение передачи тепла в напыленных материалах с плакирующими оболочками частиц способствует уплотнению структуры, зарождению центров кристаллизации расплава при плазменном напылении покрытий, что положительно влияет на их упрочнение. Оценивая состояние вопроса и эффективность способов получения композиционных керамических (оксидных) порошков для плазменного напыления, можно сделать вывод, что одним из наименее сложных и наиболее технологических методов получения композиционных оксидных порошков является метод агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием. Такой процесс изготовления композиционных порошков позволяет обеспечить следующие преимущества при плазменном напылении: более равномерное распределение компонентов в покрытии, по сравнению с использованием механических смесей, из-за отсутствия сегрегации; повышение температуры частиц вследствие интенсификации процессов теплообмена в плазменной струе; повышение скорости частиц вследствие интенсифицирования ускорения частиц в плазменной струе; повышение износостойкости, прочности и плотности покрытий.

Описание технологии получения композиционного керамического материала. Получали порошки оксидной керамики с введением плакированной твердой смазки следующих составов [1]: композиция $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$; композиция $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{CaF}_2\text{-Ni})$; композиция $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-10\%}(\text{графита-Ni})$. Смешивание мелкодисперсных компонентов шихты проводили в баночном смесителе модели 022. Затем навески шихты помещали в барабаны ротационного гранулятора марки 03-03-01. Вводили связующее и проводили операцию гранулирования. Гранулирование шихты проводили на оптимальных режимах работы ротационного гранулятора, обеспечивающих наибольший выход мелкодисперсных фракций: количество шихты в барабане – 125 г; скорость вращения барабана – 36 об/мин; угол наклона барабана – 40° . Для исследования влияния времени гранулирования на кинетику формирования агломератов через 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 часа после начала операции гранулирования отбирались пробы материала, которые после удаления связующего, спекания, дробления и отсева подвергались исследованиям. Режимы удаления связующего, спекания, дробления и отсева во всех опытах поддерживались постоянными. Установлено влияние времени процесса гранулирования на содержание различных фракций в порошке. Для напыления отбирали фракцию 40 – 63 мкм. Полученные результаты показывают, что наибольший выход фракции порошка размером 40 – 63 мкм, достигается при времени гранулирования 2 – 2,5 ч.

В таблице приведены результаты измерения фракционный состав порошка – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ после гранулирования порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ без и с введением твердой смазки. Затем полученные конгломераты помещали в алундовые лодочки ПД-КВПТ, которые устанавливали в сушильном шкафу. Удаление легкоиспаряющегося компонента связующего проводили при температуре 150°C в течение 1,25 ч. Спекание материала проводили при температуре 1100°C в течение 4 часов в камерной печи СНО 1,6.2,5.1/II-Y2. Размол материала осуществляли на шаровой мельнице МБЛ-1. Операцию рассева проводили с использованием воздушного классификатора для выделения фракции от 40 до 63 мкм. После рассева порошок фракцией от 40 до 63 мкм вводили в струю плазменного распылителя (плазматрон F4 фирмы Плазма-Техник, Швейцария) мощность 40 кВт и производили их распыление в стальной цилиндр длиной 1 м, заполненный аргонном. Степень сфероидизации определяли по форм-фактору частиц (степень несферичности, значение 1 – соответствует сфере) методом оптической металлографии. Мощность плазменной струи изменяли от 10 до 50 кВт.

Таблица

Результаты измерения фракционный состав порошка - $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ после гранулирования

Способ гранулирования порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	Процентное соотношение фракционный состав порошка после гранулирования, мкм				
	0 – 40	40 – 63	63 – 80	80 – 100	более 100
с введением твердой смазки. ($\text{MoS}_2 + \text{Ni}$)	4	28	20	30	18
без введения твердой смазки	8	48	20	10	14

Оптимальный форм-фактор -0,9 (более 65 %) частиц получается при мощности плазменной струи 40 кВт. При мощности плазменной струи менее 40квт частицы имеют форм фактор 0,5 – 0,8. При повышении мощности плазменной струи свыше 40 кВт повышение значения форм-фактора частиц незначительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ получения композиционного керамического материала: пат. № 13690 Респ. Беларусь, МПК C04B 35/10../ В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый: заявитель и патентообладатель БНТУ – № а 20090464; заявл. 30.03.2009; бюл. № 5,2010.

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ЭЛЕМЕНТОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ
ПОКРЫТИЯМИ ФРИКЦИОННЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ**

В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск
А. И. Камко
Гомельский завод литья и нормалей

Одним из наиболее эффективных путей решения задачи повышения ресурса и улучшения работоспособности пар трения скольжения, эксплуатирующихся при повышенных удельных нагрузках, является использования композиционных пластичных смазок в сочетании с технологиями, обеспечивающими формирование металлических покрытий толщиной 0,05 – 0,5 мм. Покрытия из цветных металлов и низколегированных сталей, которые, как правило, мягче стальных или чугунных деталей, позволяют сравнительно легко обеспечить правило положительного градиента, согласно которому, процесс деформирования отдельных, наиболее нагруженных участков поверхностей трения, должен проходить только в поверхностных слоях, не вовлекая в деформацию ниже расположенный материал. Кроме того, слой относительно мягкого покрытия позволяет улучшить прирабатываемость деталей пар трения и способствует образованию в процессе трения адаптационных, субмикроскопических поверхностных пленок, обладающих повышенной адсорбционной способностью к смазочным материалам.

Для деталей узлов трения скольжения технологического оборудования и сельскохозяйственной техники авторами была разработана технология формирования на рабочей поверхности заготовок из черных металлов покрытия из цветного металла методом деформационного плакирования гибким инструментом (щеткой) с последующим нанесением слоя пластичной смазки и приработки в узле трения. Однако большая длительность процесса приработки (от 30 мин. до 1 часа) и недостаточно высокие антифрикционные свойства ($f_{тр}$ при удельных нагрузках около 20 МПа составил $\sim 0,12$) потребовали изменения процесса.

Указанные недостатки в значительной степени были устранены при использовании пластичной смазки, содержащей ультрадисперсный порошок шихты алмазосодержащей «ША» (ТУ РБ 100056180.003 – 2003) в количестве 0,5 – 1,5 мас. %. Последующая приработка осуществлялась при нагрузке 20 – 30 МПа и скорости скольжения 0,1 – 0,15 м/с в течение 5 – 15 мин.

В процессе приработки со смазкой, модифицированной «ША», в поверхностном слое покрытия из цветного металла формируется наноразмерная субструктура, характеризующаяся размером субзерен ≤ 100 нм. Образование в поверхностях трения наноразмерной субзеренной структуры вследствие присущих ей чрезвычайно высоких пластических свойств, приводит к эффективному поглощению энергии фрикционного взаимодействия при трении и облегчает приработку контактирующего сопряжения. Процесс фрикционного модифицирования, сопровождающийся измельчением формирующейся в поверхностях трения субзеренной структуры, обуславливает повышенные триботехнические свойства деталей узлов трения скольжения и в их дальнейшей эксплуатации. Коэффициент трения был снижен до 0,09, а интенсивность изнашивания уменьшена в 3 – 3,5 раза. В настоящее время технологический процесс фрикционного (трибомеханического) модифицирования тонких покрытий из меди и бронзографита используется при изготовлении шарнирных сопряжений кормо- и зерноуборочной техники.

Разработанная технология хорошо зарекомендовала себя для деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся при удельных нагрузках не более 40 МПа. Использование покрытий из бронзографита с последующим трибомеханическим модифицированием в тяжелонагруженных узлах трения не дало положительного результата, что обусловлено прежде всего их относительно низкой твердостью (не более $HV = 400$).

Для тяжелонагруженных узлов трения было предложено формировать покрытия газотермическим распылением проволок из сталей мартенситного или аустенитного классов. Исследования показали, что распыление проволок из сталей мартенситного класса необходимо осуществлять газопламенным методом, а покрытия из сталей аустенитного класса наносить методом гиперзвуковой металлизации. Кроме того, приработку в узле трения выполняют при удельной нагрузке 32 – 40 МПа и скорости скольжения 0,2 – 1,0 м/с, при этом в качестве основы смазки используют жидкие масла с кинематической вязкостью не более $50 \cdot 10^6$ м²/с (патент РБ №12982).

Повышенная задиростойкость элементов трибосопряжений, имеющих нанесенное распылением стальной легированной проволоки покрытие, обеспечивается, в первую очередь, пластичностью покрытия, облегчающей процесс приработки, в начальный период трения и высокой износостойкостью, твердостью и адгезией к смазочным материалам при дальнейшей эксплуатации узла. Это возможно только в том случае, когда в сталях сформирована двухфазная структура, содержащая метастабильный аустенит, имеющий твердость 200 – 300 HV, а также имеется определенное количество оксидов.

Авторами экспериментально установлено, что для формирования в структуре стального напыленного покрытия метастабильного аустенита, имеющего низкую температуру протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, соответствующую температурам эксплуатации узлов трения скольжения (270 – 320 K), необходимо покрытия из проволоочных сталей мартенситного класса нагревать и распылять струей газо-кислородного факела. Для получения того же эффекта при нанесении покрытий из проволоочных сталей аустенитного класса необходимо использовать плавление в электрической дуге и распылять сверхзвуковым потоком продуктов сгорания пропано-воздушной смеси (метод гиперзвуковой металлизации).

В процессе приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит трансформируется в износостойкий и твердый мартенсит ($HV = 700 - 800$) за счет протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Эксперименты показали, что для того, чтобы добавленный в смазку наноразмерный алмазно-графитовый модификатор обеспечил интенсификацию процесса приработки фрикционного сопряжения, необходимо им заполнить поры напыленных покрытий. Это условие возможно реализовать только при использовании жидких смазок с кинематической вязкостью не более $50 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$. Учитывая, что пористость стальных покрытий, полученных распылением проволоочных материалов газопламенным методом, составляет 8 – 12%, а полученных гиперзвуковой металлизацией – не более 6%, удельное давление и скорость относительного скольжения в процессе приработки должны быть значительными. Давление в гидродинамическом клине, возникающем в слое смазки в процессе приработки сопряжения, способствует заполнению пор газотермических покрытий жидкой смазкой, содержащей наноразмерный наполнитель.

В ходе триботехнических испытаний установлено, что стальные покрытия, приработанные в среде смазки с алмазно-содержащим наноразмерным наполнителем «ША», обладают достаточно высокой износостойкостью в диапазоне удельных нагрузок 50 – 100 МПа, в то время как покрытия, не прошедшие приработку в смазке с модификатором, оказались практически непригодными для эксплуатации при удельных нагрузках свыше 60 МПа.

Таким образом, для деталей узлов трения скольжения, эксплуатирующихся при нагрузках 20 – 30 МПа может быть рекомендована технология, включающая комбинацию методов деформационного плакирования и трибомеханического модифицирования. При изготовлении или восстановлении деталей трибосопряжений, в которых удельные нагрузки достигают значений 50 – 100 МПа, необходимо использовать методы газотермического напыления с последующим трибомеханическим модифицированием.

СОЗДАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

В. А. Оковитый

Белорусский национальный технический университет, Минск

Разработаны критерии получения качественных теплозащитных покрытий (ТЗП). Для этого необходимо формировать ТЗП из материалов с равномерным химическим и фазовым составом по сечению исходных порошков, с максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, с минимальным содержанием межкристаллитной влаги, со строго определенным размером и морфологией частиц исходного порошка.

В качестве материалов для керамического слоя теплозащитных покрытий (ТЗП) наибольшее применение в настоящее время получили композиции на основе частичного стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦД). Широкое применение ZrO_2 в ТЗП обусловлено его низкой теплопроводностью, высоким коэффициентом термического расширения, и, главное, возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики. Стабильность тетрагональных фаз ZrO_2 , которая оказывает основное влияние на теплозащитные свойства ТЗП, снижается в ряду применяемых стабилизаторов Yb_2O_3 , Y_2O_3 , MgO , CaO . Отрицательное влияние повышенного содержания стабилизаторов в исходном порошке на долговечность покрытий, объясняется несколькими причинами. Во-первых, исходные порошки имеют, как правило, неравномерное распределение стабилизатора по сечению, что наследуется в структуре покрытия. Во-вторых, наряду с выделениями богатых стабилизатором фаз типа $Zr_3Y_4O_{12}$, $Zr_3Yb_4O_{12}$, в покрытии формируются зерна тетрагональной фазы состава $ZrO_2 - 8,3\% Y_2O_3$, $ZrO_2 - 12,3\% Yb_2O_3$ и превращенные в моноклинную фазу зерна состава $ZrO_2 - 1,6\% Y_2O_3$, $ZrO_2 - 6,2\% Yb_2O_3$. Сегрегация стабилизатора в покрытии особенно заметно усиливается при его термообработке либо термоциклировании в случае стабилизации оксида циркония, что еще более усугубляет фазовую неоднородность покрытия. В-третьих, стабильность тетрагональной фазы во многом зависит от размера зерна фазовых включений, повышаясь с их уменьшением, что особенно заметно при размере зерна менее 1 мкм, поэтому достижение необходимого размера фазовых включений является задачей оптимизации технологии получения керамических порошков для

теплозащитных покрытий. По указанным причинам достижение равномерного химического и фазового состава по сечению исходных порошков и покрытия, с максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, является одной из основных задач техники плазменного напыления ТЗП.

Характеристики плазменных теплозащитных покрытий зависят как от вида и состояния исходного порошка, так и собственно от технологических параметров напыления. В большинстве исследований влияния технологии плазменного напыления на долговечность покрытия отмечается, что вид и состояние исходного порошка для напыления оказывают решающее влияние на качество напыленных покрытий из ЧСДЦ. Важное значение для получения качественных ТЗП имеет химическая чистота применяемых материалов. Известно, в частности, что оксид кремния дестабилизирует высокотемпературные фазы ZrO_2 . Учитывая неизбежную сегрегацию более легкоплавкого оксида кремния по границам зерен и на поверхности частиц порошка ZrO_2 , SiO_2 следует рассматривать как весьма нежелательную примесь. Термическая стабильность тетрагональной фазы ZrO_2 снижается с увеличением содержания межкристаллитной влаги в порошке. Кроме того, присутствие влаги ухудшает нагрев порошка в плазменной струе и делает его неоднородным. Существенное влияние на долговечность покрытий оказывает размер частиц исходного порошка. С одной стороны, увеличение среднего размера частиц порошка приводит к росту пористости покрытия и, соответственно, к увеличению сопротивления термоудару. Формирующиеся крупные поры, приводят к торможению движения трещин. С другой стороны, крупные частицы хуже проплавляются в плазменной струе, что приводит к неравномерности фазового состава и снижению прочности межчастичных контактов в покрытии. Важным параметром является также форма частиц порошка. В частности, применение сферических порошков более предпочтительно, так как в покрытии формируются главным образом округлые поры, а прогрев порошка осуществляется более равномерно, что особенно важно для материалов с низкой теплопроводностью. Кроме того, с развитой поверхности порошков хуже абсорбируется влага, что отрицательно влияет на качество ТЗП.

Итак, из всего вышесказанного следует, что качественные ТЗП необходимо формировать из материалов с равномерным химическим и фазовым составом по сечению исходных порошков, с максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, с минимальным содержанием межкристаллитной влаги, со строго определенным размером и морфологией частиц исходного порошка.

Диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттербия, был выбран для использования в качестве порошка для теплозащитных покрытий вместо диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, по следующей причине. У иттербия тривалентный ионный радиус (0,858 Å) значительно меньше, чем тривалентный ионный радиус иттрия (0,893 Å), и более приближен к тривалентному ионному радиусу циркония. Известно, что большие катионы вносят большие искажения в решетку ZrO_2 и требуют большего количества вакансий и более высокой температуры для образования тетрагональной фазы ZrO_2 , которая оказывает основное влияние на теплозащитные свойства. Следовательно в системе $ZrO_2-Yb_2O_3$ должен быть меньший уровень внутренних напряжений, по сравнению с любыми другими системами $ZrO_2-R_2O_3$ (где R – редкоземельный элемент). Вследствие вышеизложенного было сделано предположение, что использование Yb_2O_3 в порошках частично стабилизированного диоксида циркония, позволит получать ТЗП с ресурсом, превышающим ресурс $ZrO_2-Y_2O_3$ покрытия.

УДК 621.723

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ УПРОЧНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Л. М. Акулович, А. М. Ефимов, А. В. Линник

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск

М. Л. Хейфец

ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск

Проанализировано влияние ультразвуковых колебаний на процессы упрочнения и обработки изделий в магнитном поле. Определены способы ввода ультразвуковых колебаний в рабочую зону при магнитно-электрическом упрочнении и магнитно-абразивной обработке.

В настоящее время при восстановлении и упрочнении деталей машин или изготовлении новых с необходимым комплексом свойств, используются различные методы нанесения покрытий. Одним из перспективных путей, как интенсификации традиционных методов упрочнения поверхностей деталей машин, так и создания принципиально новых технологических процессов является широкое использование активирующих энергетических воздействий: силовых, температурных, химических, магнитных, электрических [1].

Комплексное использование активирующих факторов реализовано при магнитно-электрическом упрочнении (МЭУ) и магнитно-абразивной обработке (МАО). Общим для способов МАО и МЭУ является использование энергии магнитного поля для удержания ферромагнитного порошка в рабочей зоне и подобное конструктивное исполнение устройств, реализующих процессы [2].

Магнитно-абразивная обработка с наложением ультразвуковых колебаний. Введение ультразвуковых колебаний (УЗК) в рабочий зазор при МАО (рис. 1) позволяет избавиться от сложного механического привода осциллирующего движения заготовки и дает возможность использовать более мелкий ферроабразивный порошок.

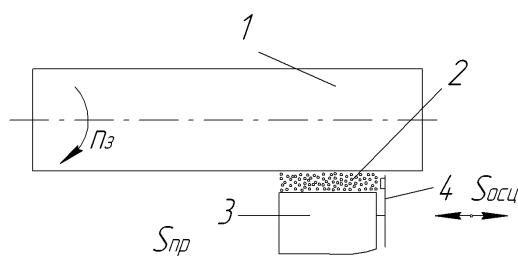


Рис. 1. Схема магнитно-абразивной обработки с наложением ультразвуковых колебаний: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – ферроабразивный порошок; 3 – полюсный наконечник; 4 – пружинная пластина.

Схема МАО с наложением ультразвука отличается тем, что механическим приводам заготовки сообщается вращательное движение, а осциллирующее движение вдоль горизонтальной оси сообщается абразивному порошку посредством введения в рабочий зазор ультразвуковых колебаний, передаваемых магнитострикционным преобразователем через пружинную пластину [3].

Микрорезание с ультразвуком позволяет за счёт изменения направления, амплитуды и частоты колебаний целенаправленно влиять на глубину царапины. Это, в свою очередь, определяет форму царапины в поперечном сечении. При подаче СОЖ действия кавитации расклинивающего и ультразвукового капиллярных эффектов приводит не только к заполнению щелевой капиллярной пористой системы твёрдого тела поверхностно-активными веществами СОЖ, но и к его разрушению [4].

Магнитно-электрическое упрочнение с наложением ультразвуковых колебаний. При введении ультразвука в рабочий зазор при МЭУ (рис. 2), обеспечивается плотное соединение расплавленных частиц ферромагнитного порошка с поверхностью заготовки и между собой. Площадь форми-

руемого покрытия под действием ультразвукового поля увеличивается, и определяется шириной излучающей ультразвук поверхности [5].

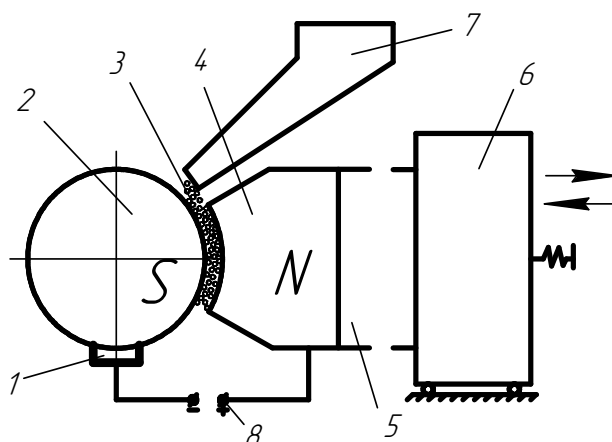


Рис. 2. Схема устройства для получения композиционного покрытия посредством МЭУ с использованием ультразвука: 1– скользящий контакт; 2 – заготовка; 3 – ферромагнитный порошок; 4 – полюсный наконечник постоянного магнита или электромагнита; 5 – магнитострикционный или пьезоэлектрический преобразователь; 6 – ультразвуковой генератор; 7 – бункер-дозатор; 8 – источник тока

При непосредственном введении в расплав ультразвукового поля препятствия для достижения прочных связей между металлической и неметаллической составляющими устраняются [5]. Кавитационные явления, происходящие в расплаве под действием ультразвуковых колебаний, являются активным средством обеспечения прочного соединения металлических или неметаллических частиц с металлической основой. Большая скорость захлопывания кавитационных пузырьков вызывает высокие локальные давления и температуры.

Кавитационный процесс развивается особенно интенсивно у границы раздела «жидкость – твердое тело» [4]. Вследствие местных высоких температур и давлений капиллярная сеть твердых частиц изменяется. В результате увеличиваются размеры микродефектов, и разветвляется их сеть.

Ультразвуковой капиллярный эффект интенсифицирует процессы проникновения с внешней поверхности твердой частицы через многочисленные устья микрощелей атомов расплава в капиллярную систему и кристаллическую решетку твердой частицы. Под действием ультразвукового поля через поверхностную сеть микротрещин в капиллярную систему проникает расплав [5].

Комплексное действие кавитации и ультразвукового капиллярного эффекта приводит к заполнению щелевой капиллярной пористой системы твердого тела расплавленным металлом.

Проведенные исследования взаимодействия твердого тела с расплавом в ультразвуковом поле показывают существенное изменение рельефа поверхности.

Следовательно, использование ультразвуковых колебаний для интенсификации процессов приводит к увеличению плотности, однородности структуры и улучшению свойств формируемых при МЭУ и МАО поверхностей деталей машин. Введение ультразвуковых колебаний в рабочую зону в процессе МАО позволяет исключить сложное кинематическое движение осцилляции обрабатываемой детали и снижает шероховатость обрабатываемой поверхности. При МЭУ с ультразвуком обеспечивается плотное соединение расплавленных частиц ферромагнитного порошка с упрочняемой поверхностью детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л. М. Акулович. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
2. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 232 с.
3. Физика и техника мощного ультразвука: Мощные звуковые поля. / под ред. Л. Д. Розенберга. – Москва : Наука, 1968. – 268с.
4. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1986. – 172 с.
5. Шиляев, А. С. Ультразвук в науке, технике и технологии / А. С. Шиляев. – Гомель : РНИУП «Институт радиологии», 2007. – 412 с.

УДК 621.822.67:621.892.5:541.183

ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОСТРУКТУРНЫМИ АЛМАЗАМИ

Л. Н. Образцов

***Кузбасский государственный технический университет
им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово***

Проведены исследования и установлено, что добавление наноалмазов в базовую смазку подшипников качения уменьшает шероховатость дорожек качения подшипников на 30%, а количество дефектов – на 40%.

Помимо традиционных методов модификации порошками металлов, весьма перспективными в смазочных материалах различного назначения оказались ультрадисперсные алмазографитовые порошки [1].

При поиске оптимального соотношения цена-качество для изделий с наноалмазами (НА) следует учитывать следующее:

- простая технология синтеза наноалмазов позволяет создать промышленное производство с низкой себестоимостью, определяемой в основном стоимостью взрывчатых веществ;
- во многих областях вместо наноалмазов допустимо использовать неочищенную алмазную шихту, которая в несколько раз дешевле очищенной;
- положительный эффект достигается при введении в материал добавок наноалмазов, как правило, от 0,01 до 1,0 мас. %.

Можно отметить следующие преимущества НА как модификаторов трения поверхностей перед другими типами веществ такого рода:

- эффективность при очень низких концентрациях в базовой смазке;
- совместимость с различными видами масел;

С целью повышения контактной долговечности подшипников качения на основе учета применения смазочных композиций с содержанием наноалмазов было проведено экспериментальное исследование которое включало в себя:

- исследование шероховатости поверхности и количества дефектов на дорожках качения наружных колец;
- исследование микроструктуры дорожек качения наружных колец;
- проверку основных выводов, вытекающих из теоретических разработок.

Объектами исследования являлись однорядные радиальные шарикоподшипники с уплотнениями 180208 ГОСТ 8882-75.

В качестве базового смазочного материала использовался Литол-24 (ГОСТ 21150–87)

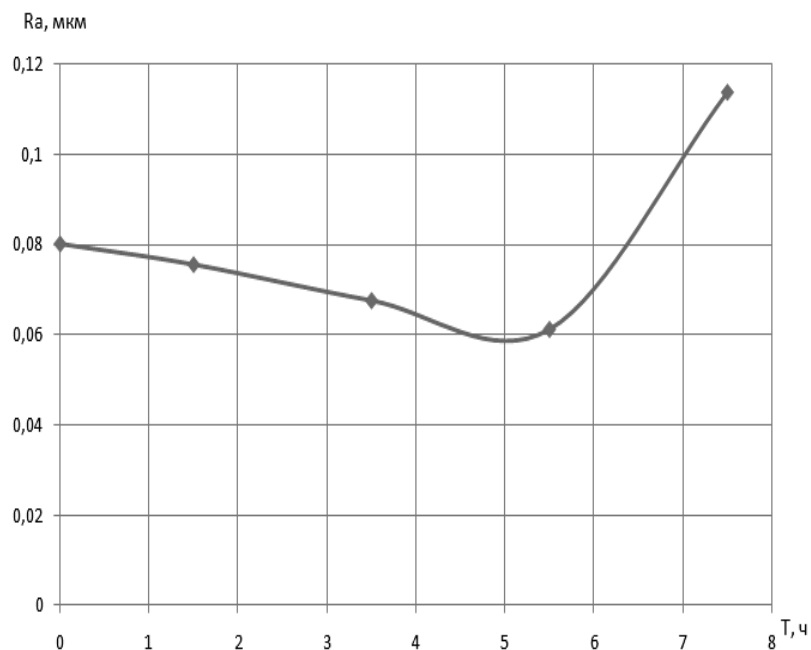
Методом механической диспергации НА добавляли в Литол-24, достигая необходимой однородности смазочной композиции.

Для испытания подшипников на контактную долговечность использовалась специальная испытательная машина ВНИПП-543.

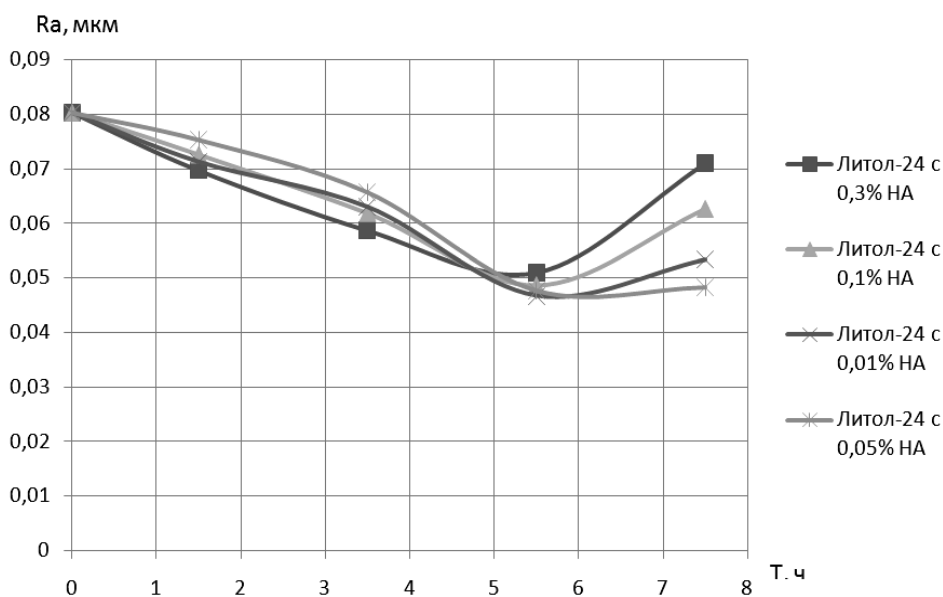
После испытаний замерялась шероховатость дорожек качения наружных колец подшипника с использованием поворотного измерительного устройства на профилографе-профилометре модели «Talysurf-5M».

Ресурс подшипника в результате испытаний определяли с учетом только усталостного разрушения; другие виды отказов рассматривались как аварийные и не учитывались при оценке расчетных характеристик.

На основе анализа информации о формировании качества поверхности при трении с добавлением в смазочный материал наноматериалов в эксперименте выбраны следующие варьируемые факторы: концентрация добавки в смазке K , % масс; время работы подшипников под нагрузкой, T час.



Зависимость шероховатости дорожек наружных колец подшипников качения от времени испытания при использовании смазки Литол-24 без модификаторов



Зависимость шероховатости дорожек наружных колец подшипников качения от концентрации в базовой смазке наноалмазов (НА) и времени испытания

Разница в шероховатости для образцов без модификаторов и с использованием НА составляет более 50%, а это значит, что при использовании только базовой смазки расчетная долговечность подшипника совпадает с действительной, в то время как при использовании 0,01 % наноалмазов экспериментальная долговечность подшипника качения намного больше

расчетной. В виду этого появляется необходимость в разработке изменений расчета долговечности подшипников качения при использовании наномодифицированных смазочных композиций.

Полученные в ходе исследований данные довольно наглядно показывают степень влияния наноматериалов на контактную долговечность подшипников качения, но вследствие изменения микротвердости в поверхностных слоях металла физико-химическое взаимодействие наноалмазов с поверхностным слоем на всей его длине может протекать по-разному, и этот процесс практически не изучен.

Проведение тонких физических исследований микро- и наноструктуры поверхностного слоя позволит установить закономерности и управлять эксплуатационными характеристиками подшипников качения на стадии производства и эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев, В. Ф. Смазка и смазочные материалы в трибосистемах: Научное издание / В. Ф. Терентьев. – Новосибирск : изд-во СО РАН, 2002. – 187 с.

УДК 620.179.1

СТРУКТУРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ НА СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

О. А. Останин

*Кузбасский государственный технический университет
им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово*

В статье описана структурно-аналитическая модель акустико-эмиссионного контроля на стадиях жизненного цикла изделий. Для стадии оценки состояния поверхностного слоя (ПС) методом акустической эмиссии (АЭ), приведена математическая модель, которая связывает параметры состояния ПС с сигналами АЭ.

Одним из базовых положений технологии машиностроения является учение о технологическом наследовании (ТН), в соответствии с которым состояние ПС детали формируется и трансформируется на всех стадиях обработки и эксплуатации, что должно учитываться при проектировании технологических, особенно, упрочняющих процессов поверхностного пластического деформирования (ППД). Для описания ТН используется фено-

менологическая теория, основанная на сквозном описании физического состояния ПС детали на этапах ее жизненного цикла в единых терминах и категориях механики деформирования и разрушения сплошных сред. Основу теории составляют представления о непрерывном накоплении деформаций и исчерпании запаса пластичности. Оценка состояния металла проводится с использованием механических параметров ПС. Для их расчета необходимо знать параметры напряженного и деформированного состояния (НДС) ПС в очаге деформации (ОД), где происходит формирование и накопление механических свойств в условиях смены знака деформации, и пластические свойства металла.

Сложность определения механических параметров состояния ПС ограничивает возможность использования этого подхода на практике. Физический характер наследственной феноменологической теории позволяет, в свою очередь, использовать для получения качественных результатов тонкие физические методы исследований.

Одним из таких методов, реально отражающим характер пластической деформации материалов на микроуровне, является метод акустической эмиссии. Известно, что акустическая эмиссия – это процесс излучения материалом механических волн, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала при его деформировании и локальном разрушении.

Существуют связи различных параметров сигналов АЭ, с одной стороны, и изменением дислокационной структуры материала (скорость дислокаций, изменение плотности дислокаций); степенью пластической деформации (скоростью деформации); технологическими факторами при механической обработке резанием и ППД (скорость обработки, подача инструмента, глубина резания, натяг), с другой стороны.

В работе выдвинута научная гипотеза о существовании взаимосвязей между параметрами сигналов АЭ и механическими параметрами состояния ПС в частности, интенсивностью скоростей деформации сдвига H [1 – 2].

В работе предлагается структурно-аналитическая модель АЭ-контроля с учетом ТН на стадиях обработки и эксплуатации ответственных деталей машин. В качестве контекстной выбрана функция «Контролировать состояние поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла изделий с учетом ТН». Была проведена декомпозиция модели по стадиям проведения АЭ-контроля, которая представлена на рисунке 1.

В качестве ресурса в рамках данной модели (расчетный ресурс – РР) принято состояние ПС детали после выполнения предшествующего нагружения (до выполнения данной функции). Это состояние описывается совокупностью параметров, таких как параметры напряженно-деформи-

ванного состояния, упрочнения, микроструктуры, шероховатости и остаточных напряжений.

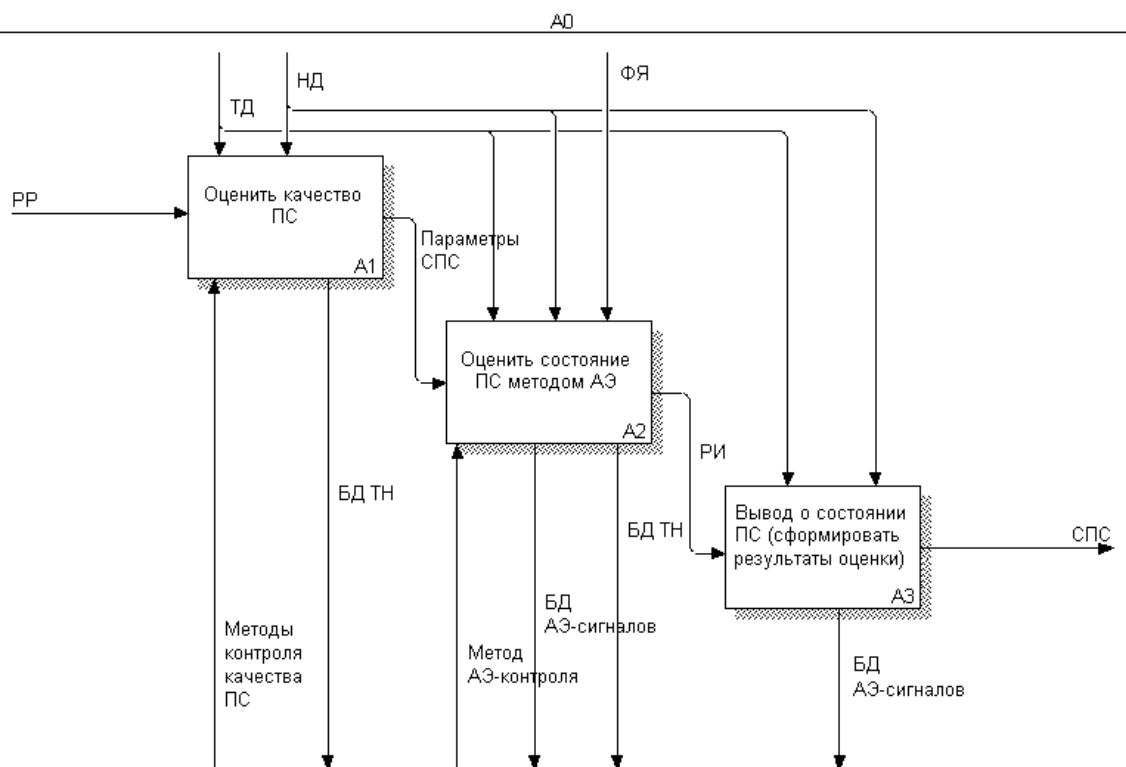


Рис. 1. Функциональная модель А0-уровня

Продуктом выполнения данной функции является также состояние поверхностного слоя (СПС), но после соответствующего нагружения поверхностного слоя, описываемое той же совокупностью параметров.

В качестве управляющего воздействия приняты техническая (ТД) и нормативная (НД) документация в области неразрушающего контроля, физико-химические явления (ФЯ), протекающие в металле в процессе эксплуатационного нагружения.

В качестве механизма исполнения функции приняты методы контроля качества поверхностного слоя и АЭ-контроля.

С целью реализации контроля качества поверхностного слоя проводится запрос к базам данных технологической наследственности (БД ТН) и акустико-эмиссионных сигналов (БД АЭ-сигналов).

Отличительными особенностями детализированной диаграммы А0-уровня являются:

1. Наличие трех основных стадий контроля – оценка качества ПС, оценка состояния ПС методом АЭ и вывод о состоянии ПС.
2. Каждый блок представляет основную подфункцию исходной функции.

3. Каждая подфункция содержит только те элементы, которые входят в исходную функцию.

4. Наличие описания истории нагружения и сохранения наследственных свойств под воздействием программ нагружения поверхностного слоя на каждой стадии в параметрах АЭ-сигнала.

5. Наличие функциональных связей между блоками (параметры состояния ПС определенные традиционными методами (параметры СПС) и результаты исследований (РИ)).

При разработке математической модели для оценки состояния ПС методом АЭ (А-2, рис. 1) принято, что распределение параметров сигналов АЭ по очагу деформации идентично распределению интенсивности скоростей деформаций сдвига в виде $H = H(xyz)$. Исходя из этого, по распределению интенсивности скоростей деформаций сдвига H можно определить распределение сигналов АЭ по длине и, что важно, по глубине очага деформации.

Формула распределения интенсивности скоростей деформаций сдвига H в общем виде для каждой линии тока имеет вид [3]:

$$H = a + b \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{d^2}\right).$$

Подставляя наследственные коэффициенты a, b, c, d , изменяющиеся по зависимости $k = a_k^h y + b_k^h$, получили:

$$H = z \iint \left[(a_a^h y + b_a^h) + (a_b^h y + b_b^h) \exp\left(-\frac{(x - (a_c^h y + b_c^h))^2}{(a_d^h y + b_d^h)^2}\right) \right] dx dy,$$

где z – толщина образца – постоянная величина; y – ордината; x – длина очага деформации; $a_a^h, b_a^h, a_b^h, b_b^h, a_c^h, b_c^h, a_d^h, b_d^h$ – наследственные коэффициенты, характеризующие распределение свойств по глубине упрочненного ПС.

Проведены расчеты и получено распределение акустических характеристик в очаге пластической деформации.

Сопоставление результатов, полученных расчетным путем, и при проведении экспериментов по методу визиопластичности, показало высокую сходимость, что свидетельствует о корректности допущений и модели в целом.

Данная модель положена в основу автоматизированной методики контроля механического состояния поверхностного слоя деталей машин в процессах механической обработки и последующей эксплуатации с учетом технологического наследования.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блюменштейн, В.Ю. Модель состояний поверхностного слоя в категориях механики технологической наследственности и сигналов акустической эмиссии / В.Ю. Блюменштейн, И. В. Мирошин // Инструмент Сибири. – 2000. – №4(7). – С. 5 – 9.
2. Блюменштейн, В. Ю. Исследование влияния истории нагружения на сигналы акустической эмиссии / В. Ю. Блюменштейн, И. В. Мирошин, А. А. Кречетов, О. А. Останин // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2005. – № 4. – С. 60 – 63.
3. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

УДК 621.791.92

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МОСТИКОВ ТРУБНОЙ РЕШЕТКИ БАРАБАНОВ КОТЛОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. Н. Смирнов, В. Л. Князьков, Н. В. Абабков

***Кузбасский государственный технический университет
им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово***

В статье рассмотрен пример восстановительного ремонта поврежденных мостиков трубной решетки барабанов котлов высокого давления. Ремонт заключался в удалении дефектного металла, наплавке модулированным током при проведении предварительной и сопутствующей термической обработки.

При проведении технического диагностирования в мостиках трубной решетки барабана котла высокого давления №2 Южно-Кузбасской ГРЭС, тип котла ПК-10 (специальная молибденовая сталь, Ø1490×95 мм, давление в барабане – 11,0 МПа, температура – 316 °С, дата изготовления 1950 г., дата пуска 1951 г., время эксплуатации – 320 тыс. ч) было обнаружено большое число дефектов, характер которых представлен на (рис. 1, а и б). Ремонт барабана выполняли в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и системы обеспечения охраны труда.

Удаление дефектов в мостиках и подготовка к наплавке. В первую очередь, закрывали отверстия водоопускных труб для предотвращения попадания в них посторонних предметов и обозначали контуры выборок мостиков по границам повреждений несмываемой краской. Особенностью выполнения условий охраны труда при работах по выборке дефектного

металла являлась необходимостью постоянной вентиляции барабана котла в период ремонта, которую обеспечивали основным и резервным вентилятором, а также применением установки тока повышенной частоты для предварительного сопутствующего подогрева и термической обработки.

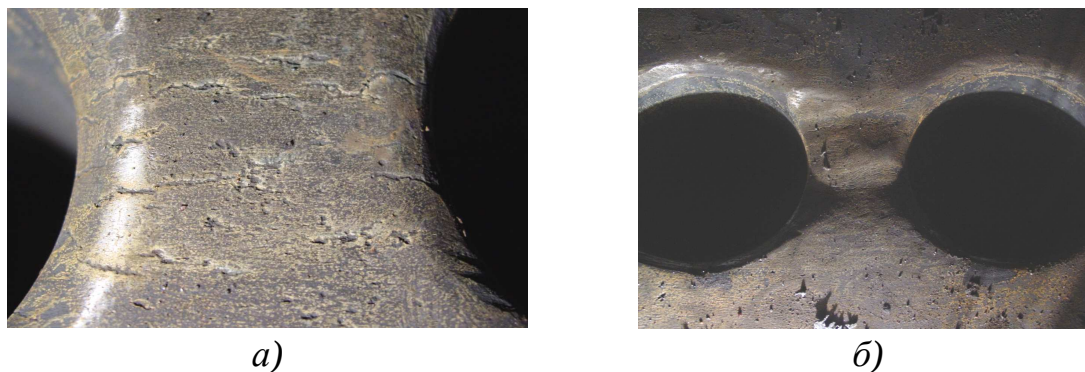


Рис. 1. Характер повреждения мостиков трубной решетки барабана:
а) растрескивание; б) вид после периодического удаления трещин

Выборку дефектов осуществляли механическим способом. Форма и размеры выборок соответствовали указанным на рисунке 2. Некоторые размеры (обозначенные *) корректировали в процессе выборки до полного удаления дефектов. Очищали поверхность барабана вокруг выборок на 100 мм до металлического блеска.

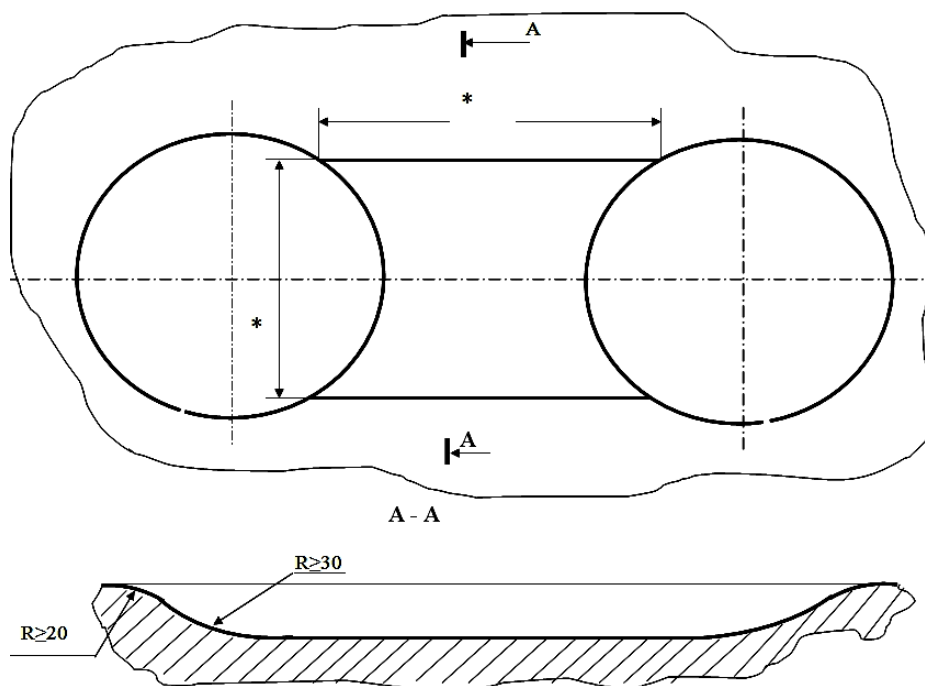


Рис. 2. Схема выборки мостиков трубной решетки барабана

После механической обработки поверхности выборок и прилегающие к ним поверхности барабана контролировали методами цветной или магнитопорошковой дефектоскопии. До проведения наплавочных работ проводили измерение твердости, которая составляла 140 – 160 НВ.

Наплавка. Для наплавки применяли электроды тип Э-46А, марки УОНИ 13/45 и тип Э-50А, марки УОНИ 13/55 по ГОСТ 9466 и ГОСТ 9467 диаметром 3 мм. Предварительный и сопутствующий подогрев проводили по режиму, показанному на рисунке 3.

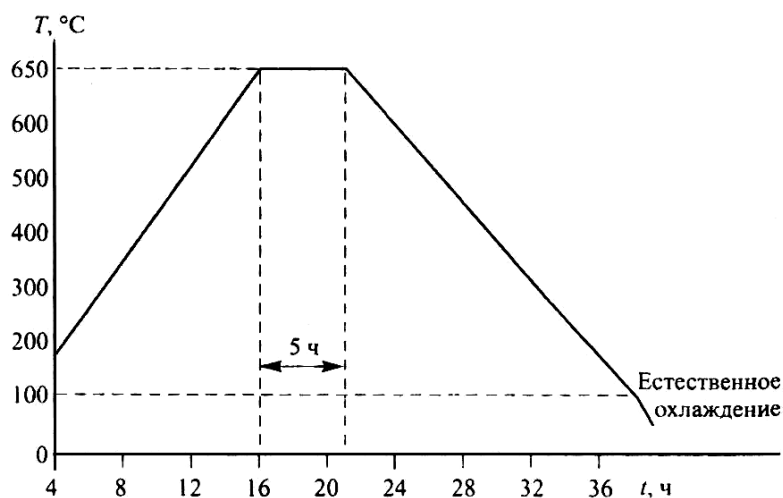


Рис. 3. Режим термообработки при ремонте мостиков трубной решетки барабана котла № 2 (ПК-10) ЮК ГРЭС

Наплавку выполняли на режимах тока 90 – 110 А. Направление наплавки изменяли при каждом проходе на противоположное, как это показано на рисунке 4.

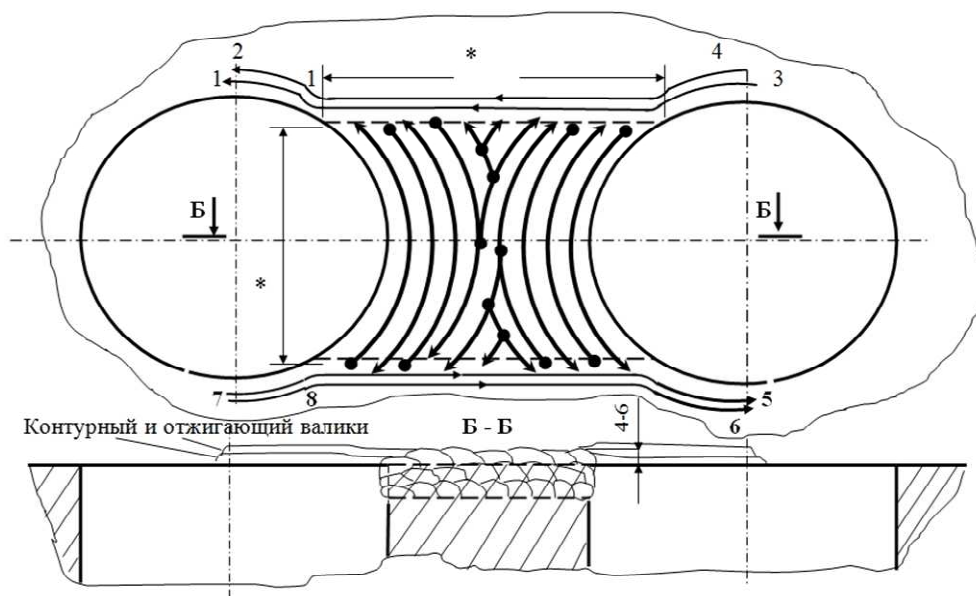


Рис. 4. Схема наплавки мостиков трубной решетки барабана

Дефекты в виде наплывов и подрезов удаляли шлифованием с последующим тщательным удалением крошек корунда. Наплавка превышала поверхность барабана на 4 – 6 мм. По завершении наплавки и полном охлаждении, её поверхность выравнивали шлифованием вровень с поверхностью барабана.

По окончании шлифовки участок наплавки выдерживали при температуре подогрева в течение 3 часов с последующим охлаждением под слоем теплоизоляции. Проводили контроль качества наплавки стандартными методами неразрушающего контроля (ультразвуковая, цветная и магнитопорошковая дефектоскопии), а также с использованием акустической многофункциональной системы «АСТРОН» (спектрально-акустический метод) и анализатора структуры и напряжений «INTROSCAN» (магнитошумовой метод). Проведенные измерения твердости показали, что значения оказались примерно одинаковы во всех зонах: наплавленный металл – 160 – 170 НВ, ЗТВ – 175 – 180 НВ, основной металл – 175 – 180 НВ. При этом значения твердости металла основных элементов барабанов из специальной молибденовой стали согласно требований нормативной документации должны находиться в пределах от 120 до 180 НВ. Таким образом, реальные значения твердости не превысили допускаемых значений.

УДК 658.58

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

К. В. Черневич

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Изучена специфика взаимодействия алюминия и его сплавов с компонентами окружающей среды, выявлена необходимость разработки эффективного метода сварки с целью повышения качества сварных соединений.

Характерными дефектами деталей из алюминиевых сплавов являются трещины, отколы и другие механические повреждения, а также коррозионные повреждения соприкасающихся с охлаждающей жидкостью поверхностей.

Большинство механических повреждений в деталях из алюминиевых сплавов устраняют сваркой.

Алюминиевые сплавы обладают рядом специфических свойств, затрудняющих в условиях авторемонтного производства их сварку [1].

Алюминий – химически активный металл, трехвалентный во всех стабильных химических соединениях. Имеет высокое сродство к кислороду и соединяется с ним даже при нормальной температуре, образуя плотную и прочную окисную пленку Al_2O_3 , покрывающую поверхность металла и делающую его коррозионно-стойким, особенно в кислых средах.

Пленка Al_2O_3 имеет высокую температуру плавления $2050^\circ C$, кипения $3500^\circ C$ и плотность, большую, чем у расплавленного алюминия – $\gamma Al_2O_3 = 3,85 \text{ г/см}^3$ [2].

При сварке окисная пленка может погружаться в металл шва, в результате чего существенно ухудшаются его наиболее ценные свойства: коррозионная стойкость, электропроводность. При этом снижаются некоторые механические свойства, могут образоваться поры. В связи с тем, что наличие пленки Al_2O_3 на поверхности свариваемого металла и электродной проволоки неизбежно, то одной из наиболее важных и трудных задач, которые приходится решать при разработке способа сварки алюминия, является очищение металла сварочной ванны от Al_2O_3 и выведение ее в шлак.

Расплавленный алюминий и его сплавы взаимодействуют практически со всеми газами, составляющими атмосферу, – с кислородом, азотом, водородом, а также с H_2O , CO , CO_2 и другими. Наблюдается как химическое взаимодействие с образованием оксидов, карбидов, нитридов и других соединений, так и активное растворение газов в алюминии [3].

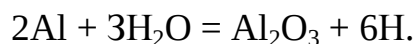
Растворимость карбидов, нитридов, сульфидов и оксидов в алюминии незначительна, они образуют неметаллические включения в металле шва, существенно ухудшающие свойства последнего. Водород, хотя и не образует химических соединений с алюминием, но активно в нем растворяется и обычно занимает более 75% в общем объеме поглощенных алюминием газов. Однако в окружающем нас воздухе свободного водорода содержится сравнительно мало, и его наличием нельзя объяснить высокую степень насыщения алюминия этим газом.

Основным поставщиком водорода в зону сварки являются водородосодержащие химические соединения, в том числе и вода, которая может находиться во флюсе, в защитных газах и в адсорбированном виде на поверхности свариваемого металла или электродной проволоки.

При сварке открытой дугой парциальное давление водорода в реакционной зоне существенно повышается за счет влажности окружающей атмосферы. Насыщение водородом алюминия проходит двумя путями:

- в результате диссоциации паров воды в дуге и растворения атомарного водорода в металле капель или сварочной ванны;

- в результате химического взаимодействия расплавленного алюминия с парами воды:



При протекании этой реакции материал сварного шва одновременно окисляется и насыщается водородом [2].

На основании приведенных выше сведений о взаимодействии алюминия с газами окружающей атмосферы применительно к заготовке алюминиевых сплавов можно сделать несколько принципиально важных выводов:

- все компоненты окружающей атмосферы в большей или меньшей мере оказывают отрицательное влияние на свойства металла шва;
- для достижения высокого качества сварных соединений из алюминия или его сплавов необходимо разработать такой метод сварки, при котором реакционная зона была бы защищена от проникновения в нее атмосферных газов;
- желательно создавать в реакционной сварочной зоне атмосферу, состоящую из неактивных по отношению к алюминию газов, не растворяющихся в нем;
- целесообразно не только защищать в процессе сварки расплавленный металл от поглощения газов, но и производить активную его металлургическую обработку.

В процессе кристаллизации и охлаждения до нормальной температуры алюминий не претерпевает фазовых превращений и сохраняет крупно-столбчатую дендритную структуру с преимущественным расположением загрязнений по границам кристаллитов [3]. Такая структура, способствует образованию кристаллизационных трещин, вероятность возникновения которых еще более усиливается в связи с большим термическим коэффициентом объемной усадки, характерным для алюминия и его сплавов. Одной из радикальных мер, приводящих к повышению стойкости металла шва против образования кристаллизационных трещин, является измельчение его первичной структуры путем модифицирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландо, С. Я. Восстановление автомобильных деталей / С. Я. Ландо. – М. : Транспорт, 1987. – 112 с.
2. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы: Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. – Киев : Коминтех, 2005. – 363 с.
3. Особенности сварки алюминия [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.weldzone.info/technology/materials/122-aluminium/256-features>.

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В. К. Ярошевич, А. И. Гуц

Белорусский национальный технический университет, Минск

Порошковые технологии нашли широкое применение при восстановлении деталей различной геометрической формы. Одним из наиболее эффективных способов нанесения покрытий является электроконтактное припекание [1].

Рассматриваемым способом можно наносить покрытия на плоские, цилиндрические (наружные и внутренние) и торцовые поверхности. Однако использование его для восстановления деталей со сложным профилем поверхности (сферические, конические) представляет определенные трудности. В настоящей работе приводится описание разработанных авторами способов и устройств, позволяющих реализовать возможности электроконтактного припекания для восстановления сферических и конических поверхностей.

Наиболее простая схема предусматривает обкатывание по детали роликового электрода, копирующего форму упрочняемой поверхности, с одновременной подачей порошка и импульсов сварочного тока в зону их контакта (рис. 1, а).

Получение покрытий на торцовых сферических поверхностях (толкателях, коромыслах и др.) осуществляется в форме из огнеупорного материала на машинах точечной сварки с помощью пуансона, копирующего форму упрочняемой поверхности (рис. 1, б).

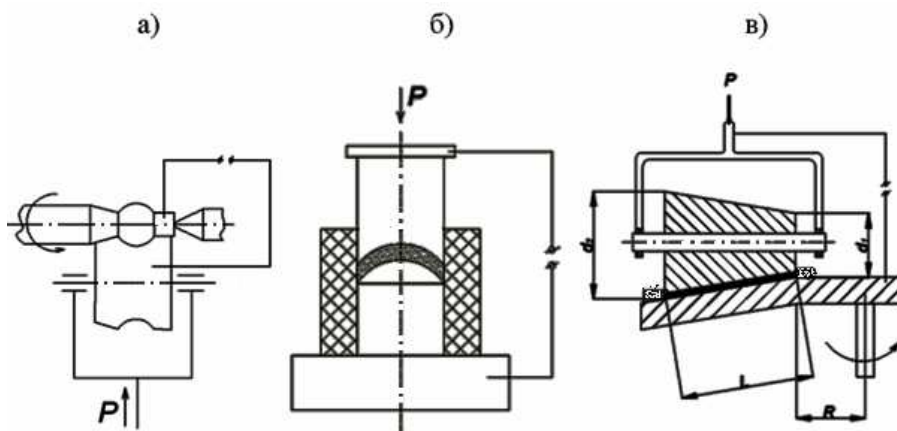


Рис. 1. Схемы нанесения покрытий на детали сложного профиля:
а) тела вращения, б) торцовые сферические, в) конические

На коническую поверхность изделия покрытие можно нанести, используя устройство, изображенное на рисунке 1, в. Порошок размещают на вращающейся планшайбе и осуществляют одновременную обкатку изделия по порошку и пропускание импульсного электрического тока, при этом изделие устанавливают меньшим диаметром к оси вращения планшайбы.

Обкатывание изделия по планшайбе без проскальзывания осуществляется, если оно своим торцом с меньшим диаметром обкатывается по планшайбе по радиусу

$$R = \frac{L \cdot d_1}{d_2 - d_1}, \quad (1)$$

где L – длина образующей конуса, мм; d_1 и d_2 – меньший и больший диаметры конуса, мм.

Для реализации разработанного принципиального решения по нанесению порошковых покрытий на конические поверхности предложена конструкция установки [2].

При значительных размерах восстанавливаемых поверхностей сложной формы можно использовать узкий роликовый электрод, перемещающийся по траектории, копирующей профиль изделия (рис. 2, а). При этом роликовый электрод размещают между двумя подпружиненными дисками из электроизоляционного материала, создающими давление на порошок по краям токоведущего ролика и повышающими качество покрытия [2].

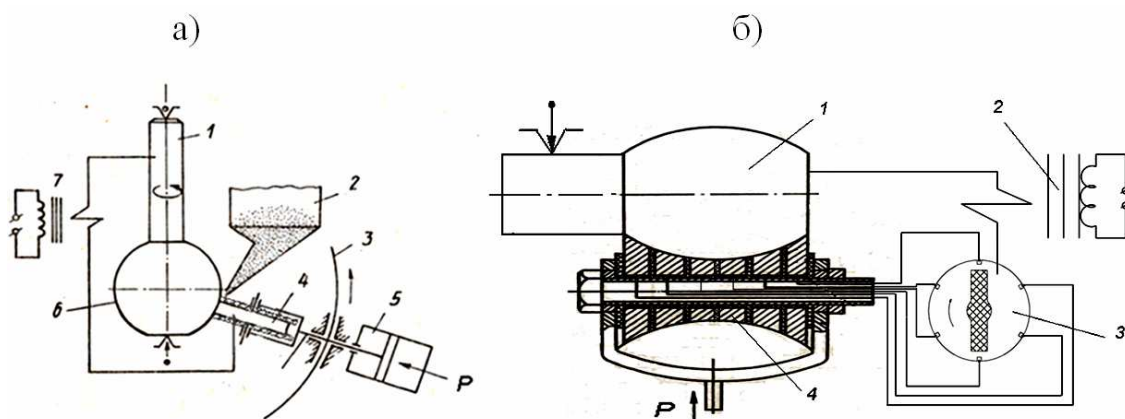


Рис. 2. Восстановление сферических поверхностей:
а) одним роликовым электродом; б) набором электродов

Перемещение роликового электрода по копиру осуществляется с помощью привода, обеспечивающего перемещение электрода по винтовой линии по всей длине сложнопрофильной поверхности.

Нанести покрытие на такие же или аналогичные по конструкции детали можно и без копирного устройства, используя метод попеременного включения роликов в работу (рис. 2, б). Выполнение роликового электрода из

отдельных секций и поочередное подключение их к источнику импульсного электрического тока обеспечивает возможность нанесения покрытий на поверхности практически любого сложного профиля.

Таким образом, электроконтактное припекание порошков обладает широкими технологическими возможностями (позволяет наносить покрытия на поверхности практически любой формы), отличается высокой производительностью и низкой энергоемкостью, что дает основание рекомендовать его для широкого использования в машиностроении и в ремонтном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович, Т. М. Теория и практика припекания порошков / Т. М. Абрамович [и др.]. – Таганрог: ТГПИ, 2008. – 320 с.
2. Ярошевич, В. К. Электроконтактное припекание порошковых покрытий и обеспечение стабильности их свойств / В. К. Ярошевич // Вест. БНТУ. – 2009. – № 1. – С. 18 – 21.

УДК 621.793:536.42

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. К. Ярошевич

Белорусский национальный технический университет, Минск

Предложены способы восстановления тонкостенных деталей автомобильных двигателей.

Одним из путей сбережения ресурсов является восстановление деталей, которые до недавнего времени подлежали замене новым. Это в первую очередь относится к бронзовым втулкам, широко применяемым в конструкциях автомобилей (втулки распределвала, верхней головки шатуна, поворотного кулака и др.). Их восстановление возможно с сохранением исходных свойств материала детали при использовании магнитно-импульсного метода напрессовки порошка на наружную поверхность и последующего спекания детали с напрессованным слоем.

Перспективность способов магнитно-импульсного формования покрытий обусловлена возможностью создания большого (до 1000 МПа) динамического давления на порошковый слой, разнообразием форм восстанавливаемых деталей, высокой производительностью процесса [1]. Прессование порошкового слоя по данной технологии производится на магнитно-импульсных установках (МИУ), рабочим инструментом которых служит многовитковый индуктор соленоидного типа, а формообразование

осуществляется с помощью электропроводящей оболочки (медной или алюминиевой), которая деформируется силами, возникающими при взаимодействии магнитного поля индуктора и вихревых токов, наведенных в оболочке (рис. 1).

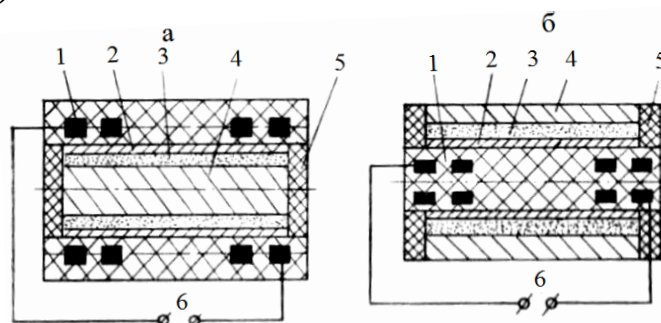


Рис. 1. Технологические схемы магнитно-импульсной напрессовки порошка методом “на обжатие” (а) и “на раздачу” (б); 1 – индуктор; 2 – электропроводящий элемент; 3 – порошок; 4 – заготовка; 5 – заглушка; 6 – генератор импульсного тока

В условиях серийного производства восстановление втулок может быть организовано на полуавтоматических устройствах роторного типа с четырьмя шпинделями. На каждой позиции выполняются подготовительные, напрессовочные, термические и иные операции (рис. 2).

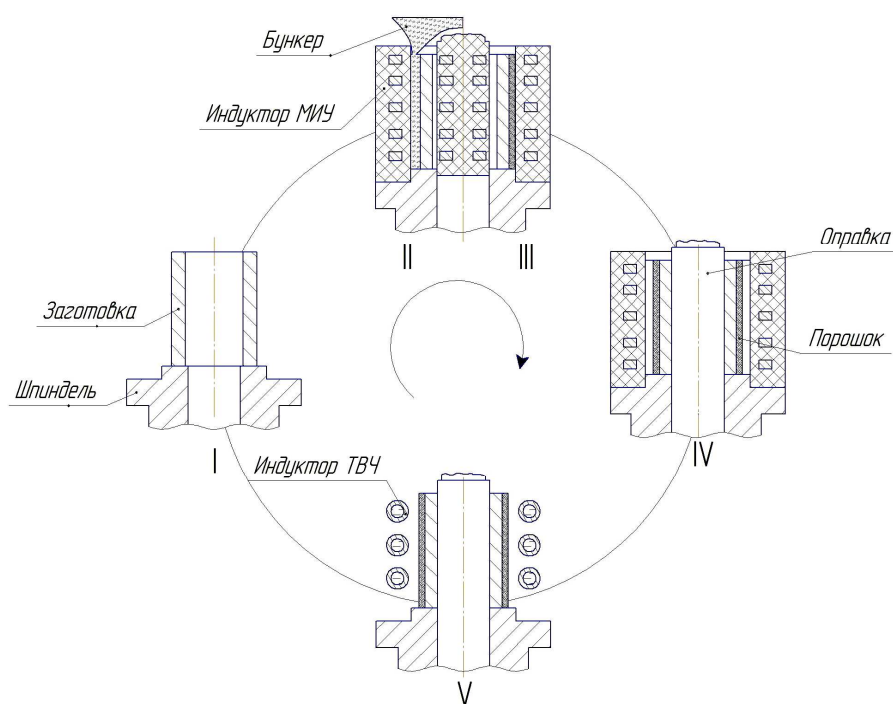


Рис. 4. Схема 4-позиционного полуавтомата для восстановления тонкостенных втулок:

I – установка заготовки на шпиндель; II – заполнение порошком зазора между заготовкой и наружным индуктором; III – раздача заготовки и прессование порошка на ее наружной поверхности; IV – обжатие заготовки с порошковым слоем на оправке; V – спекание заготовки в индукторе ТВЧ

Технологический процесс восстановления втулок состоит из следующих операций:

1. Мойка и очистка заготовки от эксплуатационных загрязнений.
2. Установка заготовки на шпиндель (позиция I).
3. Установка внутрь заготовки внутреннего индуктора МИУ и помещение всей сборки в наружный индуктор (позиция II). Заполнение порошком зазора между заготовкой и наружным индуктором. Бункер с порошком одновременно служит центрирующим приспособлением, совмещающим оси заготовки и шпинделя и обеспечивающим одинаковую толщину порошкового слоя.

Толщину порошкового слоя Δ можно рассчитать по формуле:

$$\Delta = k(\Delta_{изн} + \delta_n + \delta_v), \quad (1)$$

где k – коэффициент, учитывающий уплотнение порошка при магнитно-импульсной напрессовке ($k = 1,3 - 1,5$); $\Delta_{изн}$ – износ втулки по внутреннему диаметру, мм:

$$\Delta_{изн} = (d_u - d_n) / 2; \quad (2)$$

d_u – диаметр внутренней поверхности втулки, выбракованной по причине износа, мм; d_n – номинальный внутренний диаметр детали, мм; δ_n – припуск на обработку наружной поверхности заготовки, мм; δ_v – припуск на механическую обработку внутренней поверхности, мм;

4. Магнитно-импульсная напрессовка порошка по схеме «на раздачу» на наружную поверхность заготовки (позиция III). При этом происходит увеличение внутреннего и наружного диаметров втулки, играющей роль оболочки, а на ее наружной поверхности образуется уплотненный слой порошка (бронзового, медного, железного или композиционного).

Для уменьшения окисления порошка при последующем спекании рекомендуется вводить в него небольшое количество добавок бора и кремния [2].

5. Обжатие заготовки с порошковым слоем на оправку (позиция IV), диаметр которой меньше номинального диаметра новой детали на величину припуска на окончательную механическую обработку заготовки по внутреннему диаметру:

$$d_0 = d_n - \delta_v. \quad (3)$$

6. Спекание порошка и припекание его к заготовке в индукторе ТВЧ при непрерывном вращении для обеспечения равномерности нагрева (позиция V). В результате получается заготовка с припуском на обработку как по наружному, так и по внутреннему диаметрам.

Механическая обработка наружной и внутренней поверхностей втулки обеспечивает их номинальные размеры, а внутренняя поверхность сохраняет химический состав исходного материала и требуемую точность и шероховатость поверхности [3].

Восстановление втулок по описанной технологии может осуществляться многократно вплоть до полного износа основного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивашко, В. С. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий / В. С. Ивашко, И. В. Куприянов, А. И. Шевцов. – Минск : Навука і тэхніка, 1996. – 375 с.
2. Абрамович, Т. М. Теория и практика припекания порошков / Т. М. Абрамович, А. И. Жорник, В. К. Ярошевич. – Таганрог : изд-во ТГПИ, 2008. – 320 с.
3. Восстановление деталей машин: справочник/ Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В. П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.

УДК 621.797

УТИЛИЗАЦИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. П. Кастрюк, В. П. Иванов

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Обоснованы содержание и режимы утилизации жидких нефтесодержащих отходов ремонтного производства путем их сжигания в топке парового котла. При этом наблюдается уменьшение сажи на 85 – 90%, оксида углерода и углеводородов на 75 – 80% и оксидов азота на 40 – 45%.

Ряд процессов ремонтного производства представляют опасность окружающей среде. К таким процессам относятся: очистка изделий, сварочные и наплавочные работы, нанесение электрохимических и лакокрасочных покрытий, плавление металла, переработка резины и пластмасс, обкатка машин, работа заводского транспорта, котельной и кузницы. Однако следует отметить, что при ремонте продукции образуется примерно в 20 раз меньше отходов, чем на машиностроительных предприятиях при изготовлении такой продукции.

В результате производственной деятельности предприятия образуются опасные для окружающей среды отходы, которые в зависимости от их агрегатного состояния делятся на газообразные, жидкие и твердые. Твердые и жидкие отходы загрязняют почву и водный бассейн, а газообразные или пылевые отходы – воздушный бассейн.

В ремонтном производстве Республики Беларусь в течение года образуется до 20 тыс. т сточных вод, которые содержат моторные и трансмиссионные масла, консистентные смазки и топливные фракции, появившиеся при разборке и обкатке агрегатов, смазочно-охлаждающие жидкости и минеральные масла, применяемые при механической и термической обработке заготовок, промывочные нефтесодержащие жидкости. В стоки попадают также масла из гидравлических систем и от внутризаводского транспорта. Наибольшая доля жидких нефтяных отходов образуется при разборке агрегатов, особенно при разборке двигателей. Эти отходы включают (% объема): масла моторные 65...90, масла трансмиссионные 6...10; топливные фракции 2...6, консистентные смазки 1...2. Содержание нефтяных фракций и взвешенных веществ в сточных водах достигает 1100 мг/л. Хотя растворимость минеральных масел в воде ничтожна, но устойчивые масляные эмульсии образуются в них за счет высокой дисперсности и наличия эмульгаторов. Наиболее актуальна проблема обезвреживания жидких нефтесодержащих отходов разборочно-очистного участка за счет совершенствования соответствующих технологических процессов.

Отработавшие очистные растворы нейтрализуют реагентным методом до pH 6,8...8,5 непосредственно в очистных машинах в следующей последовательности. Измеряют концентрацию щелочи или кислоты в растворе и его объем. Рассчитывают массы нейтрализующего вещества и реагента. Подают нейтрализующее вещество при помощи кислотостойкого насоса в отработавший раствор. Для нейтрализации щелочных растворов применяют серную или соляную кислоту, а для кислотных растворов – едкий натр, кальцинированную соду или 10%-ный раствор бисульфита натрия. В течение 10 мин перемешивают раствор, например с помощью поступающего в него сжатого воздуха. Водородный показатель среды определяют с помощью универсальной индикаторной бумаги. Длительность осветления 1,5...2,0 ч. Отстоявшуюся воду после очистки применяют повторно или сливают в заводскую канализацию, осадки шлама утилизируют. Однако такой способ утилизации недостаточно эффективен. Водяные стоки предприятия могут быть сброшены в водоемы в том случае, когда предельно допустимые концентрации вредных веществ не превышают нормативных значений.

Стоки с большим содержанием органических соединений можно сжигать вместе с углеводородным топливом в паровых котлах. При этом получают нетоксичные газообразные продукты и небольшое количество твердого вещества. Процесс содержит следующие операции: накопление нефтесодержащих жидких отходов; отстаивание отходов и слив воды; эмульгирование отходов пневматическим излучателем; нагрев эмульсола

до температуры 293 К; подача эмульсола в эжектор-дозатор и смешивание его с топливом; форсуночное сжигание смеси эмульсола с топливом.

Если добиться получения диаметра капель эмульсии 30...50 мкм, то она будет расслаиваться на глубину 1 м в течение двух-трех недель. Для получения такой эмульсии целесообразно использовать ударные волны пневматического излучателя в среде, которые разрушают поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей за счет потери гидродинамической устойчивости течения этих жидкостей.

Модель эмульгирования двух несмешивающихся жидкостей показывает, что длина волны наиболее неустойчивого возмущения поверхности раздела жидкостей и наименьший размер неразрушенных капель в эмульсии определяется волновым числом, круговой частотой пульсаций скорости потока и критерием Струхала. Снижение средней скорости течения жидкостей с 2,73 до 0,98 м/с при одновременном увеличении круговой частоты пульсаций скорости потока жидкости с 0,014 до 0,378 МГц и увеличение безразмерного волнового числа с 0,20 до 2,51 и критерия Струхала с 0,8 до 31 приводит к уменьшению длины волны поверхности раздела жидкостей с 200 до 20 мкм и, соответственно, диаметра неразрушенной капли в эмульсии с 100 до 10 мкм.

Эффективность сжигания эмульсии с топливом характеризуется скоростью горения, полнотой сгорания топлива и количеством выделенного тепла. Важными факторами являются тонкость и равномерность распыления эмульсии и смешивание ее с топливом и воздухом. Когда давление водяных паров превышает поверхностное натяжение внешней пленки капли, происходит разрушение поверхности и микровзрыв капли, а ее частицы разлетаются в разных направлениях. Это приводит к дополнительному перемешиванию топлива с воздухом, повышению тепло- и массообмена внутри факела, ускорению горения. Наличие воды в эмульсии снижает температуру и длину факела, сокращает время сгорания топлива, что приводит к снижению выбросов оксидов азота и других вредных веществ с дымовыми газами.

Содержание 10% воды в эмульсии от объема смеси обуславливает снижение температуры факела примерно на 50 К, а 20 % – на 100...120 К. Следует отметить, что при малых значениях влагосодержания разрыв капель может наступить вследствие испарения топлива с ее поверхности и результирующего уменьшения толщины внешней пленки. Другим механизмом, способным вызвать такой «задержанный» разрыв является увеличение температуры испарения за счет выгорания летучих компонентов. Снижение порогового значения микровзрыва достигается уменьшением

прочности поверхностной пленки капли за счет уменьшения однородности и вязкости ее материала.

Наиболее опасными для воздушного бассейна являются оксиды азота, образующиеся в топке котла вследствие высокой температуры среды в зоне горения и наличия окислителя. Снижение выбросов NO_x при сжигании топливных эмульсий достигается путем снижения температуры газов в зоне горения и дополнительного дробления капель топлива парами вскипающей воды. Добавление 5...10% воды снижает температуру факела на 80...140°C, уменьшает массу NO_x более чем вдвое, а также уменьшает образование сажи, оксидов углерода и полициклических ароматических углеводородов.

Сжигание обводненных горючих нефтесодержащих отходов (18% воды) с топливом при равномерном распределении воды по всему объему материала в топке парового котла, кроме решения основной задачи утилизации отходов разборочно-очистного участка ремонтного завода, обеспечивает снижение выбросов токсичных веществ по сравнению с их количеством при сжигании основного топлива. Достигнуто уменьшение сажи на 85...90%, оксида углерода и углеводородов на 75...80% и оксидов азота на 40...45%.

УДК 656.13.05

АНАЛИЗ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ И ТРАНСПОРТНО-ПЕШЕХОДНОЙ НАГРУЗКИ В ГОРОДЕ НОВОПОЛОЦКЕ

Д. В. Мозалевский, Н. В. Артюшевская

Белорусский национальный технический университет, Минск

Изучены транспортные потоки, условия дорожного движения в Новополоцке, а также особенности транспортной планировки территории города. Выявлены проблемные участки для дальнейшего совершенствования организации движения в городе.

Ежегодно на территории города фиксируется 35...40 аварий с пострадавшими (отчетных аварий), при этом число погибших составляет 5...7 человек, число раненых – около 40. Наибольший вклад в статистику аварийности вносят происшествия с участием пешеходов (71% - в количестве аварий, 51% - в числе погибших).

Наибольшее количество аварий приходится на летний и поздний осенний периоды, что можно объяснить наибольшей интенсивностью

движения (в летний период), уменьшением светлого периода суток, ухудшением погодных условий и видимости (осенний период). Наибольшее число аварий совершается в пятницу и выходные дни. Самым опасным является период суток с 15 до 21 ч. Наиболее распространенным видом дорожно-транспортных происшествий (70%) является наезд на пешехода, а виновниками аварии чаще всего становятся водители индивидуальных автомобилей.

Из подъездных дорог наиболее аварийной является подъездная дорога «А» Новополоцк – РУП «Нафтан», что связано с наибольшей интенсивностью движения. Планировочные характеристики этой дороги (ширина проезжей части 9...11 м, две-три полосы движения в обоих направлениях) и схема организации движения (наличие участка с частичным односторонним движением) также способствуют увеличению показателей аварийности.

По планировочным характеристикам 13 основных транспортных узлов Новополоцка можно разделить на 4 группы:

1. Узлы, в которых сооружены развязки в разных уровнях с различными планировочными схемами (3 узла).
2. Узлы в одном уровне с кольцевой планировкой (2 узла).
3. Четырехсторонние и Т-образные пересечения в одном уровне со светофорным регулированием (5 + 1 узел).
4. Пересечения в одном уровне с отнесенными левыми поворотами без светофорного регулирования (2 узла).

В правобережной части один из транспортных узлов имеет кольцевую планировку, а второй является примыканием в разных уровнях.

Наибольшее развитие получили транспортные узлы, расположенные на скоростной дороге (две развязки в разных уровнях, кольцевое пересечение в одном уровне, два нерегулируемых пересечения в одном уровне с отнесенными левыми поворотами). Поэтому пропускная способность указанных узлов обеспечивает удовлетворительные условия движения.

Наибольшая интенсивность движения (до 600...800 авт./ч в каждом направлении) зафиксирована на улицы Молодежная и Калинина, скоростной дороге и мосту через р. Зап. Двина, соединяющих разные секторы городской территории и являющихся продолжениями внешних автомобильных дорог, связывающих Новополоцк с Полоцком, юго-западной и западной промзонами. Во вторую по транспортной нагрузке группу (с интенсивностью в одном направлении 200...500 авт./ч) входят улицы Коласа, Ктаторова, Дружбы, Слободская, Кирова, Гайдара, Блохина, Олимпийская, Заводской проезд. В третью группу по уровню транспортной нагрузки входят улицы местного значения, обслуживающие только застройку при-

легающих кварталов (Дзержинского, Парковая, Юбилейная, Школьная, Купалы, Василевцы).

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить «проблемные» участки улично-дорожной сети по сложности выполнения маневров и уровню загрузки.

Наиболее сложная ситуация с пропускной способностью и сложностью маневров в Новополоцке сложилась на перекрестке двух основных улиц – Калинина и Молодежной. Этот перекресток характеризуется самой высокой транспортной нагрузкой (до 2400 авт./ч) и наличием всех разрешенных левых поворотов. Существующие на перекрестке направляющие островки треугольной формы использованы для трассировки только пешеходных переходов через улицу Калинина. Такое решение позволяет уменьшить взаимные помехи пешеходных и правоповоротных транспортных потоков с этой улицы.

По сложности и опасности маневров на улично-дорожной сети Новополоцка следует выделить скоростную дорогу по следующим причинам.

Наличие нерегулируемых пешеходных переходов через транзитные проезжие части улицы такой категории способствует созданию конфликтных ситуаций при высоких скоростях движения, повышает вероятность возникновения и тяжесть последствий.

Наличие остановочных пунктов трамвая на центральной разделительной полосе способствует повышению хаотичности в движении пешеходов через прилегающие участки проезжей части.

Наличие на улице такой категории участка с частичным односторонним движением (навстречу общему потоку разрешено движение маршрутных автобусов) в условиях, когда дорожная разметка не является круглогодичным техническим решением, повышает опасность для движения маршрутных транспортных средств.

По опасности маневров выделяется также участок улицы Калинина в зоне единственного разрыва в разделительной полосе между улицей Молодежной и скоростной дорогой. Разрыв интенсивно используется для разворота транспортных средств, но не имеет дополнительной полосы слева для транспортных средств, выполняющих такой маневр. В результате в левой полосе происходят регулярные торможения высокой интенсивности из-за транспортных средств, ожидающих возможности разворота. Кроме того, этот участок используется для пересечения улицы Калинина пешеходами.

На перекрестке улиц Калинина – Молодежная из-за большого числа фаз ограничена пропускная способность, поэтому коэффициент загрузки в пиковые периоды приближается к максимальному значению. Именно этот узел является самым «проблемным» с точки зрения пропускной способно-

сти на улично-дорожной сети города. Схема регулирования обеспечивает повышение безопасности движения за счет разделения транспортных потоков во времени, однако одновременно снижает пропускную способность для всех направлений за счет уменьшения доли зеленого сигнала в цикле регулирования для каждого из них. Дополнительные проблемы с безопасностью движения в узле создают два нерегулируемых пешеходных перехода через улицу Молодежную, расположенные в 10 и 30 м от стоп-линий регулируемого перекрестка.

К положительным факторам при функционировании светофорного регулирования в Новополоцке следует отнести:

- применение светофоров со светодиодными светосигнальными устройствами на новых светофорных объектах (СО) (Ктаторова – Слободская, Молодежная – Василевцы). В результате улучшаются не только условия восприятия сигналов светофоров, но и показатели энергоэффективности СО;

- постепенную замену дорожных контроллеров устаревших моделей (ДКМ и особенно УК-2) на современные контроллеры производства Республики Беларусь. По состоянию на 01.01.2010 в г. Новополоцке контроллеры «Думка» управляют работой 6 СО, ДКМ – 1 СО, УК-2 – 2 СО;

- наличие в г. Новополоцке производственного участка Витебского областного строительного-монтажного управления, что обеспечивает большую оперативность в устранении возникающих неисправностей технических средств организации дорожного движения, в том числе и светофорного регулирования.

УДК 621.436.004.67

СЕЛЕКТИВНОЕ УСТАНОВЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. Г. Андруш

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск

Получена формула определения необходимой продолжительности обкатки в зависимости от средней скорости изменения мощности механических потерь, мощности механических потерь в начале обкатки и температуры масла, а также приведена блок-схема устройства селективного установления продолжительности режимов приработки, что позволяет сократить среднее время обкатки не менее чем на 15% с экономией топливно-энергетических ресурсов по сравнению с рациональным режимом.

За счет проведения высококачественной обкатки на ремонтном предприятии межремонтный срок службы двигателя увеличивается на 8...36%. В то же время проведение обкатки требует значительных трудозатрат и расхода горюче-смазочных материалов, поэтому необходимо проводить исследования по сокращению времени обкатки двигателей без снижения качества приработки трущихся поверхностей.

Исследования показали, что на мощность механических потерь в процессе обкатки, кроме частоты вращения, наибольшее влияние оказывают мощность механических потерь в начальный момент обкатки, температура масла и средняя скорость изменения мощности механических потерь.

Поэтому была поставлена задача определения необходимой длительности обкатки τ до достижения требуемого качества приработанности деталей, в зависимости от средней скорости изменения мощности механических потерь (выбранного режима обкатки, рационального для данного производства) $\bar{v}$, мощности механических потерь в начале обкатки N_{mn0} и температуры масла в начале обкатки T_{m0} :

$$\tau = 56,5 \cdot N_{mn0} - 2,375 \cdot \bar{v} + 1,875 \cdot T_{m0} - 462,125. \quad (1)$$

Назначая продолжительность приработки для каждого двигателя по предложенному алгоритму, среднее время обкатки можно сократить не менее чем на 15...30% по сравнению с известными режимами.

Нами разработано устройство селективного установления продолжительности приработки на обкаточном стенде, блок-схема которого представлена на рисунке 1.

Информационным параметром хода приработки является величина мощности механических потерь, которая, в свою очередь, определяется по показанию датчика 12 момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала на весовом механизме стенда на фиксированной частоте вращения.

Измерение производится на фиксированной частоте вращения с тем расчетом, чтобы каждый раз не учитывать влияние частоты вращения коленчатого вала на мощность механических потерь. Этим уменьшают число влияющих факторов, объем исследовательских работ и упрощают алгоритм управления.

Датчиком 12 измеряют момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала на фиксированной частоте вращения и датчиком 16 температуру масла обкатываемого двигателя; вычисляют на линеаризаторе 17 мощность механических потерь при данной температуре. Затем на третьем вычитающем элементе 18 сравнивают мощность механических потерь обкатываемого двигателя с мощностью механических потерь, соответствующей обкатанным.

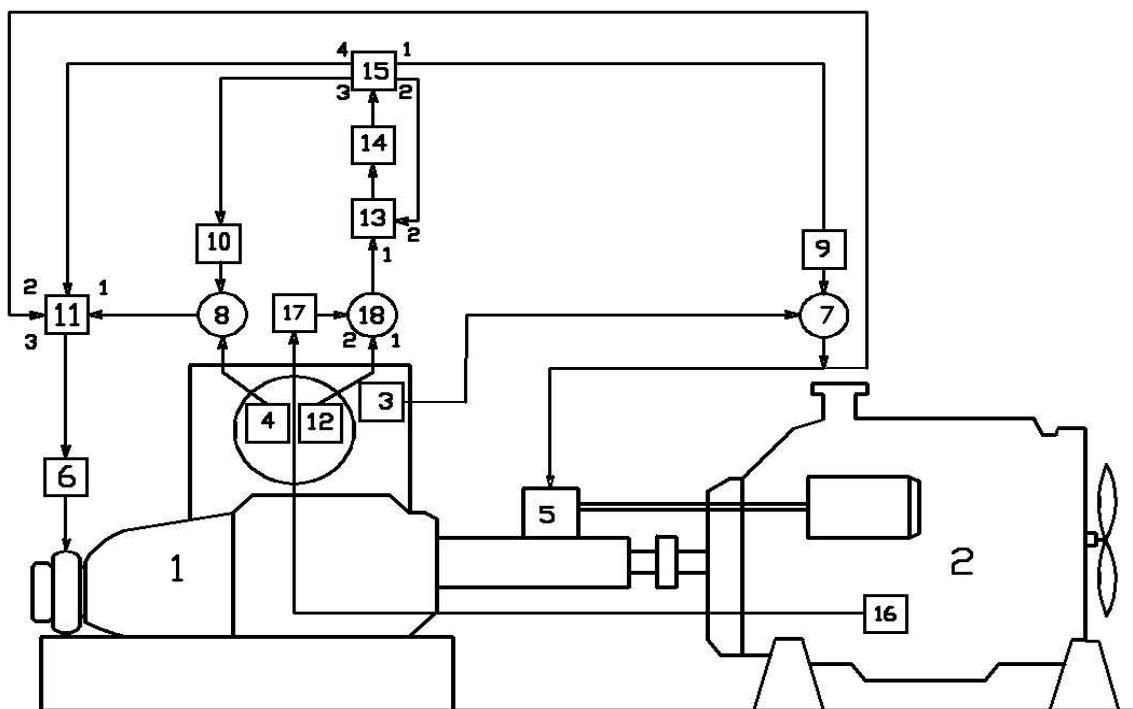


Рис. 1. Блок-схема устройства селективного установления продолжительности обкатки двигателя внутреннего сгорания: 1 – нагрузочное устройство; 2 – обкатываемый двигатель; 3 – датчик частоты вращения; 4 – датчик нагрузочного момента; 5 – исполнительный механизм частоты вращения; 6 – исполнительный механизм нагрузочного устройства; 7 – первый вычитающий элемент; 8 – второй вычитающий элемент; 9 – задатчик частоты вращения; 10 – задатчик нагрузочного момента; 11 – переключатель; 12 – датчик момента сопротивления прокручиванию; 13 – устройство опроса; 14 – блок назначения длительности приработки; 15 – блок управления; 16 – датчик температуры; 17 – линейаризатор; 18 – третий вычитающий элемент

Сигнал, равный разности между величиной мощности механических потерь обкатываемого двигателя при данной температуре и величиной мощности механических потерь обкатанного двигателя с учетом выбранного рационального значения средней скорости изменения мощности механических потерь с выхода третьего вычитающего элемента 18, поступает на вход устройства 13 опроса, на котором запоминается. В зависимости от величины этого сигнала блоком 14 назначается продолжительность приработки. Чем меньше эта разность и выше средняя скорость изменения мощности механических потерь, тем меньше время, необходимое для приработки обкатываемого двигателя.

Чистый дисконтированный доход при программе ремонта 771 двигатель ЯМЗ-236М составляет 3673 тыс. бел. руб., срок возврата капитальных вложений 2,3 года при годовой экономии 2,2 т дизтоплива и 13955 кВт·ч электроэнергии, годовом экологическом эффекте 159 тыс. бел. руб.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЯ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛИТЕЙНЫХ ПРЕСС-ФОРМ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

С. Э. Завистовский

Полочкий государственный университет, Новополоцк

Восстановление рабочих поверхностей крупногабаритных деталей сложной геометрической формы является сложной инженерной задачей. Предложена конструкция специального наплавочного оборудования, оснащенная следящим приводом, использование которой совместно с установкой полуавтоматической дуговой наплавки позволило решить поставленную задачу.

Наиболее распространенной по сложности геометрической формой поверхности деталей пресс-форм является коническая. Для получения аналитических зависимостей использовали модель, представленную на рисунке 1.

При механизированной наплавке деталь вращается вокруг своей оси со скоростью n , а наплавочная головка перемещается вдоль детали со скоростью V_n . Для сохранения постоянного вылета электрода необходимо повернуть ось вращения детали на угол α , при этом головка будет перемещаться вдоль образующей конуса.

Для поддержания скорости наплавки постоянной, необходимой для наплавки валика требуемых параметров и равной в начальный момент $V_n = 2\pi R_0 n_0$, нужно, чтобы скорость вращения детали изменялась следующим образом:

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{V_i}{R_0} \right) t \sin \alpha}.$$

При наплавке отдельными валиками шириной b , которые выполняются на поверхности с шагом d так, что перекрывают друг друга на опре-

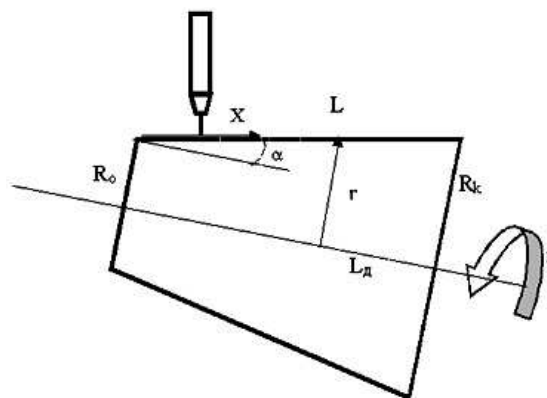


Рис. 1. Схема наплавки конической поверхности детали

деленную величину, число валиков, которые необходимо нанести, чтобы наплавить всю поверхность, должно быть

$$N = \frac{L - kb}{(1 - k)b},$$

где $k = \frac{b - d}{b}$ – коэффициент перекрытия валков.

Оптимальная частота вращения, при которой горелка перемещается относительно поверхности со скоростью V_n при наплавке i -того валика, задается выражением

$$n_i = \frac{V_i}{2\pi \left\{ r_0 + \left[\frac{b}{2} + (i - 1)d \right] \sin \alpha \right\}}.$$

Полученные аналитические зависимости применены при проектировании специальной установки для наплавки крупногабаритных деталей литейных пресс-форм сложной геометрической формы, принципиальная схема которой показана на рисунке 2.

Разработанное оборудование, реализующее технологию дуговой наплавки, включает в себе конструкцию, содержащую наплавочную головку, пульт управления и вращатель для закрепления заготовок деталей литейных пресс-форм, с габаритами по диаметру – 50...1200 мм, длине – 100...1000 мм и массой до 700 кг.

Вращатель обеспечивает вращение заготовок литейных пресс-форм с диапазоном регулирования частоты вращения заготовки 1...10 мин⁻¹. В установке конструктивно достигнуты угловые вертикальные перемещения наплавочной головки по предусмотренным конструкцией направляющим. Причем в установке реализована следящая система. Это необходимо для реализации технологии восстановления и упрочнения поверхностей деталей литейных пресс-форм сложной конфигурации.

Восстанавливаемая деталь приводится во вращение по средством мотор-редуктора, управляемого с помощью частотного преобразователя мод. VFD007I43A. Деталь установлена в центрах, один из которых является вращающимся. Наплавляющая головка статически установлена на установочной тумбе.

Ввиду значительной массы обрабатываемой детали и сложности обеспечения устойчивости режимов вращения и перемещения, установка выполнена по рельсовой компоновочной схеме и может быть использована для ремонта деталей длиной до 4 м.

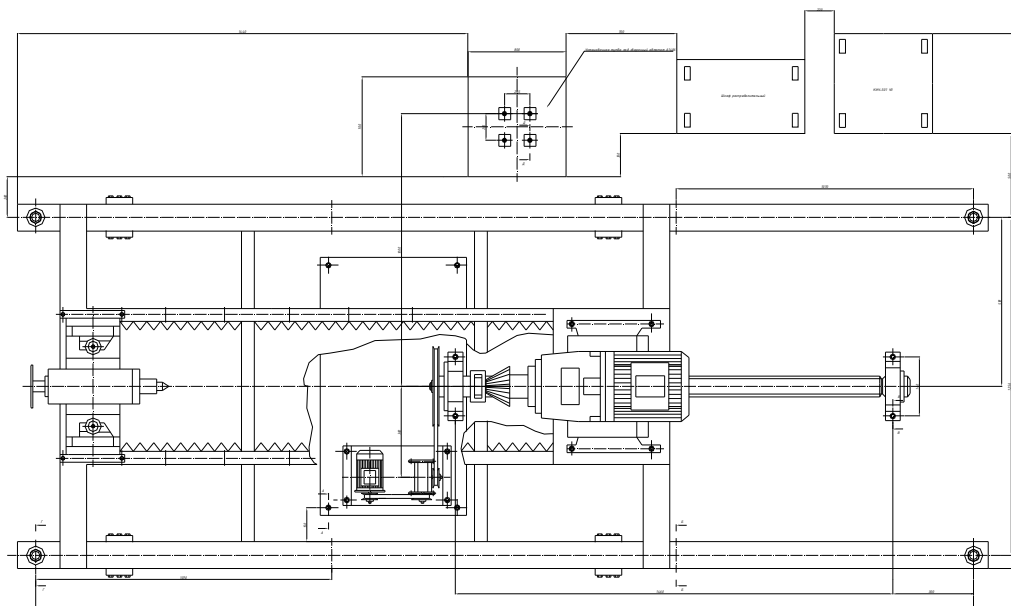


Рис. 2. Принципиальная схема и комплект оборудования для восстановления поверхностей деталей литейных пресс-форм методом дуговой наплавки

Привод вращения детали установлен на передвижную тележку. Тележка перемещается по горизонтальным направляющим посредством передачи винт-гайка качения и приводится в движение от силового электродвигателя, управляемого с помощью частотного преобразователя мод. VFD007И43А, через понижающую клиноременную передачу и червячный редуктор 2Ч-40-40-51-1110-УЗ. Наплавляющая головка имеет вертикальное перемещение относительно вертикальных направляющих сварочного полуавтомата.

Установка оснащена следящей системой управления. При реализации следящей системы управления сигнал, вырабатываемый копировально-измерительным прибором, воздействует на регулируемый привод рабочего органа и вызывает соответствующие перемещения последнего.

Наплавка проводилась на режимах: при вылете электрода – 10–12 мм; при смещении электрода в сторону, противоположную вращению детали, – 4 мм; при частоте колебаний электрода – 1,0 Гц; при расходе CO_2 – 8–12 л/мин. Скорость вращения образцов рассчитывалась, исходя из требуемой линейной скорости наплавки, для среднего радиуса конической поверхности. На рисунке 3 показан типичный фрагмент наплавленной поверхности.



Рис. 3. Типичный фрагмент наплавленной поверхности

Анализ геометрии наплавленных поверхностей подтвердил влияние вышеуказанных параметров (угла конусности, радиуса конической поверхности, амплитуды колебаний) на неравномерность толщины наплавленного слоя, которую можно снижать при заданной геометрии детали, уменьшая ширину наплавляемого слоя.

После наплавки производился полный цикл обработки детали, включающий термическую обработку и комплекс отделочно-шлифовальной обработки.

Оборудование изготовлено в рамках выполнения ГНТП «Защита поверхностей» и внедрена на заводе «ИНВЕТ» (г. Бигосово) для восстановления геометрических параметров изношенных поверхностей крупногабаритных литейных пресс-форм.

НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

В. Э. Завистовский

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Надежность определяется методами расчета, оценивания или прогнозирования. Учитывая большое разнообразие видов и модификаций деталей машин и существенное различие режимов их работы в разных системах, результаты расчета надежности механических или технологических систем носят лишь ориентировочный характер и ими, как правило, пользуются на стадии проектирования.

Анализ видов повреждений деталей машин, включая и восстановленных, показывает, что одной из основных причин выхода их из строя является наличие дефектов металла, сварки, усталостных трещин и т.п. Наличие дефектов обусловлено как технологией изготовления изделия, так и его эксплуатацией. Непровары, поры, несплавления и другие дефекты рассматривают как трещины, их делят на одиночные и групповые дефекты.

Статистический анализ показал, что в качестве аппроксимирующей функции плотности распределения размера начального дефекта можно использовать двухпараметрический закон Вейбулла. Наряду с этим привлекают и ряд других зависимостей [1]. Выражения для плотности распределения применяемых ниже законов (нормального, двухпараметрического распределения Вейбулла – Гнеденко, равномерного) следующее:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad -U_P \leq \frac{x-m_x}{\sigma_x} \leq U_P; \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right), \quad 0 \leq \frac{x}{\theta} \leq U_P; \quad (2)$$

$$f(x) = 1/(2x_P), \quad m_x - x_P \leq x \leq m_x + x_P, \quad (3)$$

где m_x , σ_x , θ , β , x_P – параметры соответствующих распределений.

Вне указанных интервалов значение $f(x)$ принято равным нулю, вследствие чего выполняется нормирование функций.

Размер критических дефектов находят через характеристики статической трещиностойкости. Распределение усталостной трещины происходит до тех пор, пока величина коэффициента интенсивности напряжения

(КИН) не превысит своего предельного значения K_{fc} , которое часто заменяют на предельное значение КИН при статическом нагружении K_{1c} , определяемое по ГОСТ 25.506-85, т.е. используют условие статической трещиностойкости. Переход от значения K_{fc} к K_{1c} (K_c для заданной толщины) можно осуществлять при известных сведениях об этих характеристиках, т. к. в ряде случаев параметр циклической трещиностойкости может быть ниже и иметь меньший разброс [2].

В качестве параметра поврежденности рассматривают не только длину трещины, но и другие показатели уровня дефектности [3, 4]. Численные методы допускают применение различных законов роста дефектов.

Для одиночной трещины в момент времени t [5] вероятность того, что длина трещины будет меньше заданного значения, имеет вид

$$P\{x_t \leq b\} = \int_0^b f_0(x, \theta_0) P\{x_t \leq b | x = x_0\} dx, \quad (4)$$

где $P\{x_t \leq b | x = x_0\}$ – вероятность того, что трещина с начальной длиной $x = x_0$ за время t увеличит свою длину до значения x_t , не превышающего b .

Известно, что повреждаемость материалов на инкубационной стадии макроскопического разрушения характеризуется развитием системы микродефектов, проявляющимся в непрерывном их зарождении и увеличении размеров [6]. При этом предельное состояние – образование макротрещины – может быть достигнуто либо за счет объединения части дефектов, когда размеры наибольших трещин станут соизмеримы со средним расстоянием между трещинами в системе, либо путем развития доминирующей микротрещины до уровня макротрещины. Учитывая неоднородность структурных свойств материалов на участках, соизмеримых по размерам с микрометровыми трещинами, можно утверждать, что длины таких трещин будут случайными величинами.

Эксплуатация целого ряда машин и механизмов недопустима при наличии в ответственных деталях макроскопических трещин. Ресурс таких деталей будет лимитироваться временем развития малых трещин до образования одной или нескольких макротрещин длиной, достаточной для их надежной идентификации методами неразрушающего контроля. Очевидно, что разработка мероприятий по управлению надежностью на основе прогнозной информации является типичной задачей принятия решений в условиях неопределенности, зависящей от так называемых природных факторов, не известных или известных с недостаточной точностью в момент принятия решения и обусловленная их недостаточной изученностью [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Завистовский, В. Э. Обзор законов распределения случайных величин при расчетах надежности технических систем / В. Э. Завистовский // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. – 2004. Фундаментальные науки. – № 4. – С. 108 – 122.
2. Применение инженерных методов расчета показателей надежности элементов конструкций с повреждениями / Н. А. Махутов [и др.] // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 3 – 8.
3. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 490 с.
4. Когаев, В. П., Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
5. Бруевич, Н. Г. Количественные оценки надежности изделия / Н. Г. Бруевич // Основные вопросы теории и практики надежности. – М.: Сов. радио, 1971. – С.5 – 25.
6. Богданофф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. Козин. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
7. Завистовский, В. Э. Надежность элементов конструкций с повреждениями / В. Э. Завистовский, О. В. Коробов // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. – 2011. – № 8. – С. 42 – 47.

УДК 674.05

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ УПРОЧНЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ. ТРИБОЛОГИЯ И ХАРАКТЕР ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

И. В. Мурашова, А. Д. Губко, И. Г. Олешук, И. Л. Поболь
физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

Исследованы возможности повышения ресурса работы режущего инструмента в процессе резания древесных материалов путем нанесения тонкопленочных покрытий. Установлено, что путем упрочения поверхности твердосплавного инструмента покрытиями систем Ti-TiN и ZrCN достигается повышение ресурса работы ножей в процессе черновой обработки кромок дверей из сосны и ели в 5,4 раза, при этом коэффициент трения снижается, а микротвердость возрастает.

Резание древесных материалов отличается от резания металлических материалов. В первую очередь это связано с ухудшением теплоотвода в процессе резания. В настоящее время в деревообрабатывающей промышленности широкое применение находит инструмент из твердого сплава. Его достоинствами являются высокие значения прочности и твердости.

Однако при работе с древесными материалами значений износостойкости недостаточно для обеспечения высокого качества резания.

Одним из способов повышения ресурса работы твердосплавного инструмента является нанесение на его поверхность тонкопленочных упрочняющих покрытий, способных создать переходную зону между обрабатываемым материалом и резцом.

Цель работы – исследовать возможность повышения ресурса работы режущих пластин в процессе резания древесных материалов, изучить механические свойства инструмента.

Предметом исследований являются твердосплавные режущие пластины марки T04F со средней величиной зерна WC 0,5 – 0,8 мкм производства «Leuco» размером 20 – 30 × 12 × 1,5 мм, упрочненные методом катодно-дугового осаждения в вакууме из ускоренных потоков плазмы в НИЦ «Плазмотеґ» ФТИ НАН Беларуси покрытиями систем Ti-TiN и ZrCN.

Толщина наносимых слоев определялась путем предварительной частичной маскировки тушью образцов-свидетелей с последующим нанесением на них покрытий. Последующее частичное удаление покрытия выявляло толщину слоев.

Микротвердость измерялась на микротвердомере Struers Duramin с использованием нагрузки 0,01 – 0,981 Н (10 – 100 г). Измерения шероховатости проводилось на профилометре модели 296.

Исследования триботехнических характеристик упрочненного инструмента проводились на трибометре возвратно-поступательного типа, пара трения «сталь, шарик 4 мм (сфера) – пластина из твердого сплава (плоскость)», приложенная нагрузка 1 Н, длина хода (трека) 3 мм, линейная скорость 4 мм / с. Индентор из стали ШХ-15.

Производственные испытания стойкости инструмента выполнялись на предприятии ОАО «Барановичидрев» на обрабатывающем центре с ЧПУ «Rover-B4». С использованием упрочненного инструмента осуществлялась черновая обработка кромок дверей из сосны и ели. Скорость резания составляла 9000 об. / мин. Критериями износа инструмента в процессе эксплуатации служило образование дефектной кромки на заготовке двери в процессе обработки.

Исследовались твердосплавные ножи для деревообработки (рис. 1, а). Толщина наносимых упрочняющих слоев на поверхности образцов составляла 2 – 5 мкм (рис. 1, б). После нанесения покрытий проведены исследования механических характеристик ножей. Установлено, что значения микротвердости поверхности инструмента возрастают. Так, в исходном состоянии микротвердость пластин без покрытий составляет 2075 – 2160 HV и возрастает после нанесения слоев до 2610 HV (Ti-TiN) и 2740 (ZrCN).

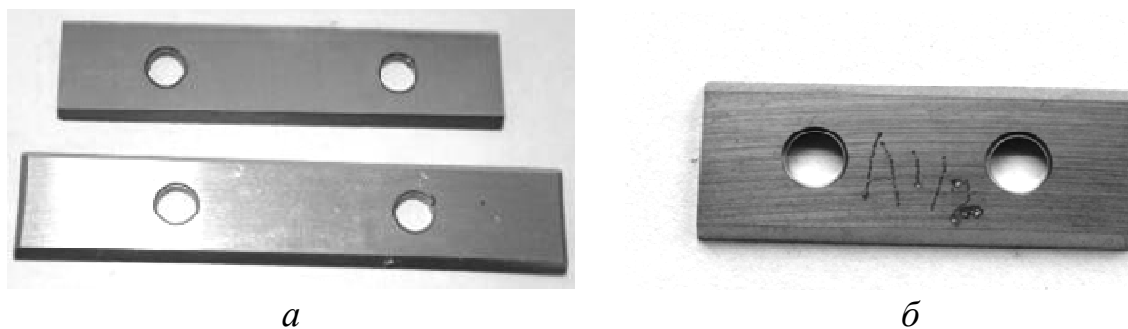


Рис. 1. Внешний вид твердосплавного упрочняемого инструмента до нанесения покрытий (а), с упрочняющими слоями (б)

Исследование поверхности кромок инструмента показали, что в состоянии поставки поверхность достаточно ребристая, что связано с заточкой инструмента. После нанесения слоев рельеф заточки сохраняется, однако наблюдается размытие бороздчатости, рельеф поверхности сглажен.

Упрочненные ножи устанавливались на концевые четырехпозиционные концевые фрезы для черновой обработки кромок изделий (рис. 2). В ходе проведения промышленных испытаний установлено, что с помощью инструмента с покрытиями систем Ti-TiN и ZrCN обработаны кромки 540 дверей. Ресурс работы неупрочненных режущих пластин составляет 100 дверей.



Рис. 2. Внешний вид концевой 4-позиционной фрезы для черновой обработки кромок изделия

Таким образом, в ходе испытаний выявлено, что стойкость твердосплавного режущего инструмента, упрочненного методом катодно-дугового осаждения в вакууме из ускоренных потоков плазмы покрытиями систем Ti-TiN и ZrCN в 5,4 раза выше, чем у режущих пластин, не подвергнутых упрочнению. Достоверность проведенных исследований подтверждена актами испытаний.

Исследования трибологических характеристик поверхности упрочненного твердосплавного инструмента показали, что коэффициент трения для пластин без покрытий находится на уровне 0,8 – 0,7, для инструмента с покрытиями системы Ti-TiN – 0,6, для пластин с покрытием системы ZrCN – 0,3.

В результате проведенных исследований установлено, что путем упрочнения поверхности твердосплавного инструмента тонкопленочными покрытиями систем Ti-TiN и ZrCN достигается повышение ресурса работы ножей в процессе черновой обработки кромок дверей из сосны и ели в 5,4 раза, при этом коэффициент трения снижается, а микротвердость возрастает.

УДК 621.7.044

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВАРОЧНУЮ ВАННУ ПРИ СВАРКЕ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Д. П. Рудак, В. Ю. Макаров, О. П. Штемпель

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

В работе описаны основные проблемы, возникающие при сварке легированных сталей, и способы их преодоления. Рассмотрен способ улучшения сварного шва, выполненного на среднелегированной стали 15X5M, путем сопутствующего вибрационного воздействия на ванну.

Тенденции развития современного машиностроения таковы, что применение легированных сталей становится все более широким. В современных условиях, связанных с растущими требованиями к качеству выпускаемой продукции и обеспечению безопасности процессов, а также с учетом многообразия технологических процессов и их интенсификации усложняются условия работы оборудования и расширяется номенклатура применяемых материалов, и сталей в частности. В связи с этим возникает ряд проблем, связанных с обеспечением надежности сварных соединений из таких сталей.

К числу основных трудностей, которые приходится преодолевать при сварке легированных сталей и сплавов, относятся:

- обеспечение стойкости металла шва и околошовной зоны против образования трещин;
- обеспечение коррозионной стойкости сварных соединений;
- получение и сохранение в процессе эксплуатации требуемых свойств сварного соединения;
- получение плотных швов.

Более высокая подверженность средне- и высоколегированных сталей образованию трещин объясняется следующими специфическими особенностями строения и условий кристаллизации сварных швов: сильно развитой транскристаллитной направленной первичной микроструктурой; увеличенной литейной усадкой кристаллизующегося металла; значительными растягивающими напряжениями в сварочной ванне в процессе ее затвердевания; многокомпонентным легированием, усиливающим вероятность появления малых количеств легкоплавкой эвтектической составляющей на границах дендритов в момент завершения кристаллизации сварочной ванны.

На практике нашли применение следующие пути предотвращения кристаллизационных трещин в высоколегированных швах:

- создание в металле шва двухфазной структуры, ограничение содержания в нем вредных примесей и легирование такими элементами, как молибден, марганец, вольфрам;
- применение фтористо-кальциевых электродных покрытий и фторидных сварочных флюсов;
- применение различных технологических приемов.

Предлагается повысить стойкость сварных швов и обеспечить их долговечность путем механического воздействия на сварочную ванну [1, 3].

Исследования, проведенные на среднелегированной стали 15X5M, показали эффективность вибрационного воздействия на сварочную ванну непосредственно в процессе сварки [2]. Вибрационное воздействие на свариваемые образцы предложено реализовать посредством электромагнитных колебаний. Сравнивались свойства сварных швов с предварительной и последующей термообработкой и свойства после вибрационного воздействия.

В результате исследований выявлено улучшение механических свойств: повышение ударной вязкости на 8 %, снижение микротвердости материала в зоне термического влияния на 15 – 18 %.

Металлографические исследования образцов показали, что при вибрационной обработке наблюдается снижение неоднородности структуры (рис. 1, 2), ведущее к возможному уменьшению уровня остаточных напряжений и повышению ударной вязкости.

Таким образом, при замене предварительного подогрева на сопутствующую вибрационную обработку наблюдается улучшение технологических свойств при снижении экономических и трудовых затрат.

В дальнейшем предполагается исследование влияния сопутствующих механических воздействий на сварные швы из высоколегированных коррозионностойких сталей.

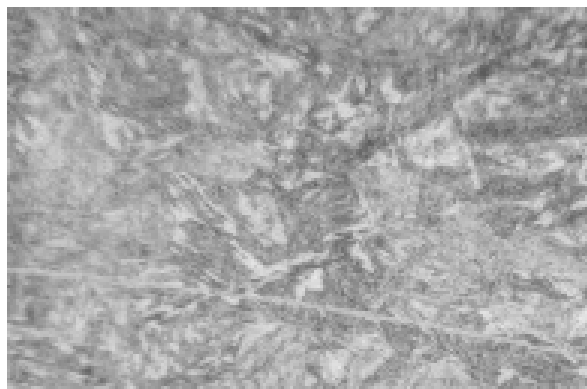


Рис. 1. Структура сварного шва, выполненного с подогревом

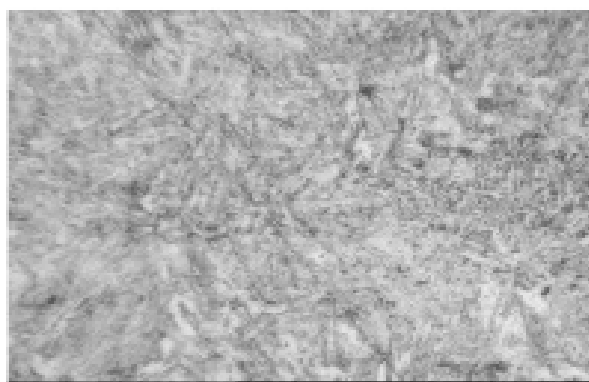


Рис. 2. Структура сварного шва, выполненного под вибрационным воздействием

ЛИТЕРАТУРА

1. Халимов, А. Г. Работоспособность сварных соединений из стали 15Х5М / А. Г. Халимов, С. В. Бакиев, Р. С. Зайнуллин. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. – 84 с.
2. Хаддад, Джассем Али. Совершенствование технологии ремонта змеевиков трубчатых печей из стали марки 15Х5М с применением вибрационной обработки в процессе сварки / Джассем Али Хаддад, Р. Г. Ризванов, А. М. Файрушин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 2.
3. Сутырин, Г. В. Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой / Г. В. Сутырин // Сварочное производство. – 1983. – № 2. – С. 23 – 24.

УДК 621.791.93

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАДВИЖЕК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ МЕТОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ

А. В. Дудан

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Обоснованы преимущества использования тонкослойного горизонтального электрошлакового нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности задвижек запорной арматуры.

Надежность эксплуатации задвижек запорной арматуры определяется качеством материала и механической обработки уплотнительных поверхностей клина (шибера) и корпуса.

В ремонтных условиях нефтеперерабатывающих предприятий восстановление уплотнительных поверхностей деталей задвижек по результа-

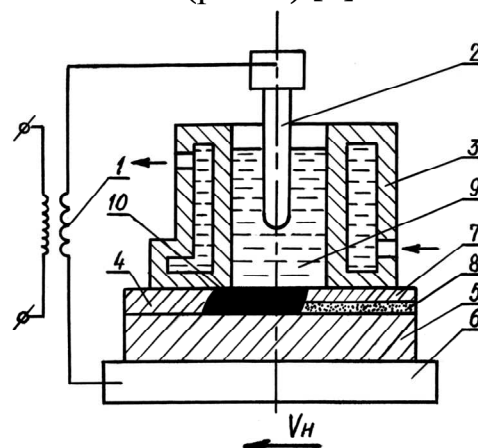
там наших исследований наиболее целесообразно выполнять методами электродуговой и электрошлаковой наплавки с применением электродных проволок из высоколегированных хромоникелевых сталей в сочетании с порошковыми сплавами системы Ni-Cr-B-Si-C.

Использование указанных материалов позволяет повысить эрозионно-коррозионную стойкость деталей в 2...4 раза.

Для осуществления технологических процессов восстановления клиньев и корпусов задвижек разработаны специализированные установки, обеспечивающие получение качественных покрытий в автоматическом режиме.

Перспективным методом повышения сроков службы таких деталей может быть способ горизонтального электрошлакового упрочнения по слою порошкового присадочного материала, который позволяет получать тонкослойные покрытия 1...5 мм на рабочих поверхностях с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами (рис. 1) [1].

Рис. 1. Схема горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием стальной ленты: 1 – источник питания; 2 – неплавящийся электрод; 3 – водоохлаждаемый кокиль-кристаллизатор; 4 – покрытие; 5 – наплавляемая деталь; 6 – силовой стол; 7 – стальная лента; 8 – порошковый присадочный материал; 9 – шлаковая ванна; 10 – металлическая ванна



Установка состоит из источника сварочного тока 1, графитового неплавящегося электрода 2, кокиля-кристаллизатора 3 и силового стола 6. Упрочняемая деталь 5 устанавливается на силовом столе и имеет возможность горизонтального перемещения относительно кокиля-кристаллизатора в необходимом для наплавки направлении. Кокиль-кристаллизатор движется по стальной ленте 7 и слою порошкового присадочного материала 8, при этом в его внутренней полости графитовым электродом наводятся шлаковая 9 и металлическая 10 ванны. При перемещении силового стола жидкий металл попадает под нижний торец задней стенки кокиля-кристаллизатора, формируя наплавляемое покрытие 4.

Ведение процесса наплавки таким методом позволяет получать износостойкие гомогенные покрытия с различными физико-механическими свойствами как по ширине, так и по длине упрочняемого слоя. Способ обеспечивает уменьшение глубины проплавления основного металла до 0,2...0,5 мм, улучшение структуры наносимого покрытия, дает возможность получения слоев разнообразных систем легирования.

Необходимым условием надежности задвижек запорной арматуры является обеспечение повышенных требований к точности формы и шероховатости уплотнительных поверхностей деталей. Для удовлетворения этих требований были разработаны процесс и необходимая технологическая оснастка доводки рабочих поверхностей. Особенность процесса заключается в применении специально разработанного абразивного инструмента, позволяющего обеспечивать качество обработки уплотнительных поверхностей для задвижек, работающих при давлении до 15 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожкин, Н. Н. Электрошлаковая наплавка изношенных деталей неплавящимся электродом по слою легирующей шихты / Н. Н. Дорожкин, А. В. Дудан // Автоматическая сварка. – 1987. – № 3. – С. 64.

УДК 621.039.546

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ТВЭЛОВ

Д. В. Юшкевич, А. Д. Губко, И. Г. Олешук, И. Л. Поболь
Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

Изучена возможность электронно-лучевой сварки деталей тепловыделяющих элементов из сталей STS 410 и JIS S45C. Исследованы геометрия сварных швов, микроструктура и микротвердость сварных соединений.

Одной из динамично развивающихся областей техники во всем мире является разработка и производство ядерных энергетических установок. Использование новых материалов и конструктивных решений будет способствовать повышению надежности, экологической безопасности и, как следствие, повышению конкурентоспособности продукции. В последнее время наметилась тенденция к переходу на новые виды топлива (с большим обогащением по ^{235}U и МОХ-топливо), одновременно повышается удельная тепловая мощность ядерных реакторов, возрастают температурные и механические нагрузки на детали тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), ускоряются процессы коррозионного разрушения деталей, в том числе в области сварных соединений [1]. Поэтому актуальной является разработка новых технологических процессов получения неразъемных соединений из углеродистых и нержавеющей сталей, сплавов на основе циркония, используемых для изготовления ТВЭЛов.

В Физико-техническом институте изучена возможность электронно-лучевой сварки (ЭЛС) деталей тепловыделяющих элементов из сталей

STS 410 и JIS S45C (аналог AISI 1045), используемых для изготовления ТВЭ-Лов. На рисунке 1 представлена фотография трубки ТВЭЛа и заглушки до проведения ЭЛС.

Для получения сварных соединений использовали комплекс электронно-лучевого оборудования, разработанный на основе аппаратуры ЭЛА-15 (максимальная мощность луча при сварке 15 кВт, вакуум в рабочей камере 10^{-3} Па). Для получения кольцевых швов была изготовлена специализированная оснастка с регулируемой скоростью вращения шпинделя.

Для исследования микроструктуры сварных соединений образцы подвергали шлифовке, полировке и травлению. Травление стали JIS S45C осуществляли 4-процентным раствором HNO_3 в этиловом спирте, а стали STS 410 – реактивом Марбле (100 мл HCl , 20 г CuSO_4 , 100 мл H_2O). Исследования проводили на оптическом металлографическом микроскопе ММР с цифровой камерой ТКМ.

Измерение микротвердости осуществляли на поперечных шлифах образцов с помощью приборов ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76. Нагрузка на индентор составляла 100 г.

На рисунке 2 представлен внешний вид сварного соединения из сталей STS 410 JIS S45C. Глубина сварного шва составляет 1 – 1,5 мм, ширина шва в верхней части – около 2 мм. Трещины, поры, неметаллические включения в сварном шве и зоне термического влияния отсутствуют.

На рисунке 3 представлена микроструктура сталей JIS S45C (а) и STS 410 (б) при увеличении 400. Сталь JIS S45C (аналог стали 45Г) имеет мелкозернистую феррито-перлитную структуру, соответствующую 9 – 10 баллам по ГОСТ 5639-82 с микротвердостью 2 ГПа. Нержавеющая хромистая сталь STS 410 характеризуется мелкозернистой структурой сорбита с включениями карбидов. Микротвердость стали составляет 3,5 – 4,7 ГПа.

Микроструктура сварного шва, полученного с помощью электронно-лучевой сварки сталей JIS S45C и STS 410, показана

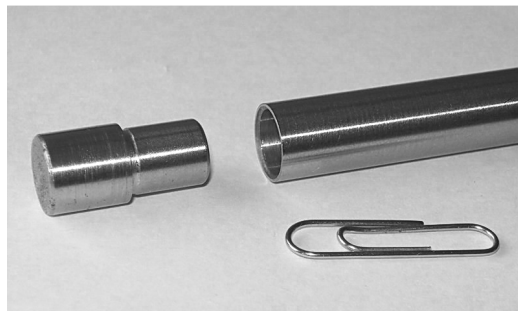


Рис. 1. Фотография заглушки и трубки твэла до сварки

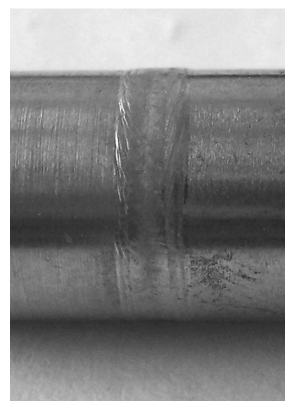


Рис. 2. Внешний вид сварного соединения из сталей STS 410 JIS S45C

на рисунке 4. Сварной шов имеет дендритную мартенситную структуру с микротвердостью 5,0 – 6,4 ГПа. Увеличение микротвердости металла сварного шва связано с образованием закалочных структур.

При переходе от границы сплавления к стали JIS S45C наблюдалась зона термического влияния (ЗТВ) шириной до 0,2 мм. Микротвердость в ЗТВ соответствовала значениям в основном металле, а размер зерна увеличился до 3 баллов по ГОСТ 5639-82.

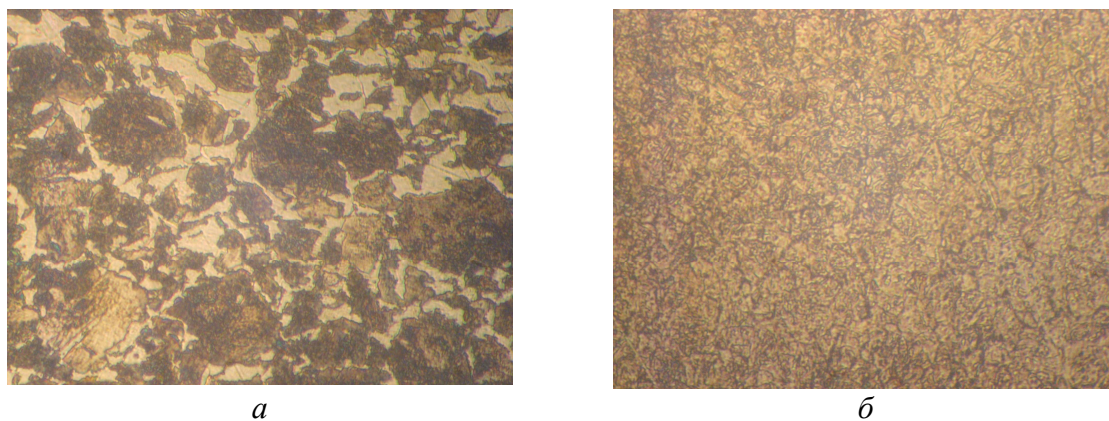


Рис. 3. Микроструктура сталей JIS S45C (а) и STS 410 (б)

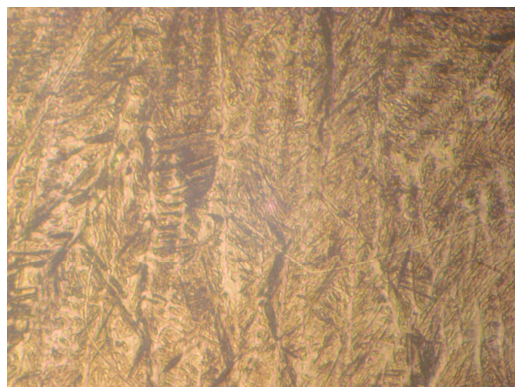


Рис. 4. Микроструктура сварного шва, полученного с помощью электронно-лучевой сварки сталей JIS S45C и STS 410

Таким образом, металлографические исследования соединений, полученных из разнородных сталей (углеродистой и нержавеющей хромистой) с использованием электронно-лучевой сварки, показали, что в сварных швах образуется дендритная мартенситная структура с микротвердостью до 5,0-6,4 ГПа. Для снижения твердости металла шва необходимо применять предварительный подогрев деталей перед сваркой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернар, П. Французский опыт и перспективы обращения с ОЯТ и РАО / П. Бернар // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 1. – С. 38 – 41.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ КАЗАНА ЧУГУННОГО В УСЛОВИЯХ ОАО «ТЕХНОЛИТПОЛОЦК»

А. А. Иванькович, А. Л. Лисовский

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Приведены данные применения методики проектирования, с использованием методов математического моделирования кокиля казана чугунного на ОАО «ТехнолитПолоцк» с использованием CAD и CAE-систем, а также 3D-проектирования с моделированием полей температур и напряжений.

Разработка систем автоматизированного проектирования кокильной оснастки на протяжении долгого времени остается одним из самых важных и в тоже время сложнейших вопросов литейного производства. От решения этого вопроса в значительной степени зависит уровень технологии и степень автоматизации процесса кокильного литья.

Математические методы позволяют с высокой долей вероятности предсказывать свойства будущей реальной отливки или оснастки, прогнозировать возможности образования тех или иных дефектов.

Анализ многочисленных научно-технических публикаций показывает, что на предприятиях литейного производства Республики Беларусь и стран СНГ при проектировании кокильной оснастки в значительной степени доминируют традиционные подходы, не использующие методы математического моделирования и опирающиеся на полуэмпирические методы расчета кокиля [1, 2]. В настоящее время для решения проблем проектирования кокильной оснастки предлагаются различные CAD-системы, позволяющие повысить методы проектирования с использованием методов машинной графики. В тоже время известно, что разрабатываемая оснастка для кокиля должна учитывать особенности затвердевания отливки и процессы заполнения кокиля. Следует учитывать и процессы формирования напряжений как в кокиле, так и в отливке, при этом обычные CAD-системы оказываются неэффективны [2].

Моделирующие системы не предназначены для генерации технологических параметров. Так или иначе, все параметры моделируемой технологии пользователь-технолог в качестве входных данных должен определить сам: полную геометрическую модель отливки и формы, параметры всех материалов, граничные и начальные условия, отражающие технологию, и т.д. Несмотря на то что физические характеристики материалов, без-

условно, связаны с параметрами, заданными в технологии, чаще всего эта связь неизвестна, причем иногда неизвестна даже на качественном уровне.

В этом случае необходимо использовать так называемые САЕ-системы (системы автоматизированного моделирования), которые позволяют моделировать и анализировать процессы литья в кокиль.

Технологические модули, входящие в CAD / CAM / САЕ-системы, представляют собой функциональную интегрированную среду, поддерживающую практически все технологические процессы, используемые в машиностроительном производстве: производства литейных форм, пресс-форм и штампов. Именно САЕ-системы являются реальным инструментом выбора и оптимизации кокильной оснастки. Одной из таких систем моделирования является компьютерная система «ПроЛит-1.0» [2], позволяющая моделировать процессы течения и кристаллизации металла в песчано-глинистых формах. Однако эта система не позволяет промоделировать процесс формирования напряжений и деформации в кокиле при его заполнении и тем самым оценить его стойкость. Хорошо известно, что именно стойкость кокиля является одной из важнейших характеристик, которую необходимо учитывать, выбирая оптимальную пространственную конфигурацию кокильной оснастки.

В настоящее время в БНТУ с использованием описанного выше подхода разрабатывается программный комплекс САПКО-1 (система автоматизированного проектирования кокильной оснастки), включающий следующие компоненты: CAD-систему построения геометрической твердотельной модели, систему моделирования заполнения и кристаллизации металла («ПроЛит-1.0»), компьютерную систему для расчета напряжений и деформаций в кокиле, надстроечный модуль, позволяющий выбирать и оптимизировать конструкцию кокиля.

На основе этой модели нами было принято решение, используя данный подход, спроектировать кокиль казана чугунного для ОАО «ТехнолитПолоцк».

После анализа процесса заполнения системы «отливка – литник» осуществлялось моделирование и расчет напряжений и деформаций в отливке. На основе этих данных проводилась оценка вероятности образования трещин в отливке. Если вероятность образования трещин была высока, то литниковая система, соответствующая этому варианту, отбрасывалась и осуществлялся дальнейший перебор вариантов. Таким образом, алгоритмическая схема позволила системно анализировать литниковые системы для кокильных отливок и предложить наиболее перспективный вариант для дальнейшей разработки кокиля казана чугунного.

Далее анализировались различные варианты кокильной оснастки на основе расчетов температурного поля кокиля казана, поля напряжений и деформаций кокиля казана. На первом этапе для заданной отливки разрабатывалось несколько вариантов компоновки кокиля казана. Потом для каждого варианта кокиля производился перебор перспективных вариантов литниковых систем. Для каждой комбинации «кокиль – литниковая система» проводились повторные расчеты возможности образования недоливов и трещин в отливке и расчет вероятности образования трещин в кокиле. Основными критериями при выборе кокиля казана являлись критические значения предела прочности с учетом марки чугуна, а также наличие различных участков перегрева, снижающих стойкость кокиля.

Для минимизации массы литниковой системы и кокиля казана, но не в ущерб качеству отливок и стойкости кокильной оснастки, использовали возможности САД-системы по определению объема 3D-модели, определяли массу литниковой системы и кокиля казана. Полученный массив данных сортировали по массе и производили выбор оптимального сочетания «кокиль – литниковая система». Далее экспериментально апробировали полученный вариант и в случае получения неудовлетворительного варианта вносили коррективы в конструкцию кокиля.

Моделирование процесса заполнения кокиля и моделирование напряженного состояния кокиля казана и отливки оценивали по методике, предложенной А. Н. Чичко, Т. В. Матюшинец.

Таким образом, данные расчеты позволили провести оптимизацию конструкции литниковой системы и кокильной оснастки на различных стадиях процесса проектирования. Кроме того, для кокиля казана чугунного, выбранного на основе алгоритмов, определяли вариант с минимально затратной с точки зрения материалоемкости литниковой системой и минимальной массой кокиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чичко, А. Н. Общая алгоритмическая схема процесса проектирования кокильной оснастки / А. Н. Чичко, Т. В. Матюшинец, Л. В. Марков // Литье и металлургия. – 2006. – № 1. – С. 34 – 37.
2. Чичко, А. Н. Алгоритмы оптимизации кокильной оснастки для САПР технологических процессов литья / А. Н. Чичко, Т. В. Матюшинец // ПроЛит [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://prolit-online.com/publ/1>. – Дата доступа: 15.03.2009.
3. Чичко, А. Н. Расчет динамики изменения температур при заполнении металлической формы / А. Н. Чичко, Л. В. Марков // Литье и металлургия. – 2005. – № 2/1. – С. 57 – 63.

НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЕЙ

Г. А. Уваров
УЧТП «СБС», Полоцк

В статье рассматривается проблема разработки экспертной системы виброакустической диагностики автомобилей. Предложено использование математического аппарата нечеткой логики при формировании алгоритма выявления неисправностей, что позволяет повысить достоверность процесса диагностики.

В настоящее время в условиях возрастания конкуренции на рынке транспортных услуг с целью повышения эффективности эксплуатации автомобилей становится очевидным необходимость перехода от системы планово-предупредительных ремонтов к более прогрессивной стратегии технического обслуживания «по фактическому состоянию». Переход к этой стратегии требует создания более совершенных систем технического диагностирования.

Повышение эффективности диагностирования современных автомобилей возможно путем учета больших объемов информации. При диагностировании целесообразно учитывать не только особенности конструкции и текущие значения технических параметров конкретного автомобиля, но также и точную информацию о ранее производимых диагностических и ремонтных работах, условиях его обслуживания, особенностях эксплуатации и др. Диагностирование необходимо не только для поиска неисправностей (хотя эта причина преобладающая), но и для приблизительной оценки остаточного ресурса деталей, узлов и агрегатов. В силу стохастичности внешних воздействий априори точно неизвестно, когда и какой элемент системы выйдет из строя. Процессы, происходящие при функционировании технических объектов, являются сложными, а их характеристики – неоднозначными. Задача прогнозирования остаточного ресурса узлов и агрегатов является исключительно сложной но и в то же время, исключительно востребованной.

В большинстве случаев принятие решений при диагностировании происходит в условиях закономерной неопределенности, в среде нечетких знаний. Целью настоящей работы было расширение возможностей метода виброакустического диагностирования путем использования нечетких логических переменных в рамках нечеткой логики.

Стетоскоп очень полезен при диагностировании. Диагностируя современный автомобиль, необходимо рассматривать его в комплексе, как совокупность механических и электронных систем. С помощью автомобильного стетоскопа возможно определить критическое состояние подшипников ходовой части, элементов подвески, трансмиссии, узлов и агрегатов двигателя без их снятия и разборки. По характерным звукам срабатывания электроклапанов (соленоидов), звуку работы электроприводов возможно определить (не)исправности электрических цепей, механическую функциональность окончательных электрических устройств.

Виброакустический способ диагностирования хорош тем, что не требует вмешательства в работающие системы и механизмы автомобиля, позволяя определять дефекты дистанционно. Данный способ применительно к автомобилям до недавних пор характеризовался невысокой объективностью: механизмы автомобиля издают широкий спектр звуков, колеблющиеся поверхности корпусных деталей распространяют виброакустические волны в примыкающей к ним окружающей среде – других деталях автомобиля и в воздухе. Распознать и правильно интерпретировать информативный сигнал на фоне значительных помех, определить его параметры и сделать правильный прогноз – сложная задача даже для специалиста с большим опытом.

Современные программно-аппаратные средства значительно расширяют возможности данного метода, позволяя записывать и обрабатывать виброакустические сигналы. Однако не смотря на это, полностью заменить в виброакустическом диагностировании автомобилей знания, опыт и субъективные ощущения эксперта-диагноста программно-аппаратными средствами представляется маловероятным. Известны многие попытки вывести некую универсальную формулу диагностики, применив которую можно быстро и без больших трудов найти причину неисправности. Практика не подтверждает жизненность подобных теорий: найти какие-либо абсолютные рекомендации по жесткой схеме не удастся. В реальных условиях на первый план все-таки выходит опыт специалиста, а система или алгоритм действий могут существовать только в общих чертах.

Решение задач разработки экспертной системы (ЭС) поддержки поиска неисправностей, характеризующихся многофакторной неопределенностью, не может быть найдено в рамках традиционных моделей и методов. Модели основанные только на дискретной либо континуальной математиках уже не могут отвечать требованиям, предъявляемым к современным ЭС. Наилучшие результаты дает объединение инструментов обеих математик в рамках теории нечетких множеств использованием нечеткой логики (НЛ) [1].

В отличие от традиционной математики, требующей на каждом шаге моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей,

нечеткая логика предлагает иной уровень мышления, при котором моделирование происходит на более высоком уровне абстракции.

Широкие возможности и простота реализации нечеткой логики как методологии решения проблем диагностирования определяют ее успешное перспективное использование. Важным преимуществом НЛ является то, что к электронным компонентам добавляются человеческие качества (знания и интуиция эксперта, опыт оператора), и наоборот, возможности эксперта дополняются наличием электронных баз данных неисправностей. Такая эргатическая система более эффективна, нежели чисто техническая или человеческая. Использование НЛ в ЭС оказывается весьма удобным способом формализации экспертных представлений использованием лексических переменных [2].

В реальной жизни мнения экспертов часто не носят категорический характер. Опытные специалисты-механики устанавливают причину различных шумов и стуков с определенной вероятностью, которая тем выше, чем больше опыт специалиста. Ошибка при установлении характера неисправности в некоторых случаях ведет к дополнительным затратам труда и материальным потерям, включая стоимость неоправданно использованных запчастей. Соответствующие правила на языке математической (нечеткой) логики выглядят следующим образом:

«ЕСЛИ (с некоторой степенью достоверности выполняется условие), ТО (с некоторой вероятностью получается следующий результат)».

В сложных условиях при наличии альтернатив формулировка правил усложняется, например:

«ЕСЛИ: условие A с вероятностью P_a , ИЛИ: условие B с вероятностью P_b , И: $P_a < P_b$, ТО: вероятнее C , ИНАЧЕ: (при $P_a > P_b$) вероятнее D ».

Понятие нечеткого множества – это попытка математической формализации нечеткой информации для построения математических моделей. В основе этого понятия лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать этим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать к данному множеству с различной степенью.

Сегодня нечеткая логика рассматривается как стандартный метод моделирования при принятии диагностических решений. Нейронечеткие сети, основанные на нечеткой логике, находят самое широкое применение при создании диагностических экспертных систем различного назначения. Практический опыт разработки систем нечеткого логического вывода свидетельствует, что сроки и стоимость их проектирования значительно меньше, чем при использовании традиционного математического аппарата, при этом обеспечивается требуемый уровень адаптации моделей к реальным условиям.

Практическое использование теории нечетких множеств предполагает наличие функций принадлежности, которыми описываются лингвистические термы. В качестве функций принадлежности могут применяться различные алгебраические и тригонометрические функции. В качестве математических моделей функций принадлежности могут использоваться формулы, графические формы, матричные формы (таблицы). При использовании стандартных прикладных программ по нечеткой логике (например, fuzzy-matlab) они закладываются в базу данных и вызываются в случае обращения к ним [3].

Дальнейшее развитие метода виброакустической диагностики автомобилей возможно путем создания диагностических экспертных систем основанных на нечеткой логике. Дальнейшие научные исследования в этой области позволяют на основе получаемых имперических данных расширить возможности и практическую значимость виброакустического метода диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелихов, А. Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн, С. Я. Коровин. – М. : Наука, 1990. – 272 с.
2. Минаев Ю. Н. Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе / Ю. Н. Минаев, О. Ю. Филимонова, Л. Бенамеур. – М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 205 с.
3. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736с.

УДК 621:001.895

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. Е. Сапёлкин

Национальный центр интеллектуальной собственности, Минск

Проводится системный факторный анализ разработки и реализации стратегии инновационного развития предприятий машиностроения, определяются факторы и риски внешней и внутренней среды, условия комплексной модернизации, перехода отрасли на новые технологические уклады.

В соответствии с Государственной программой инновационного развития Республики Беларусь на 2011 – 2015 годы предусматривается поэтапный переход машиностроительного комплекса на новые технологические уклады. Приоритет в реализации отраслевых программ и планов инновационного развития конкретных субъектов хозяйствования в различных регионах страны отдается IV и V технологическим укладам. Создание новых высокотехнологичных и наукоемких предприятий (производств) является приоритетной задачей инновационного развития национальной экономики. Для реализации данной задачи необходимо разработать четкую стратегию инновационного развития машиностроительных предприятий. Однако стратегическое планирование производственного потенциала предприятий машиностроения сопряжено с решением ряда методологических и практических проблем. К числу наиболее важных и актуальных проблем следует отнести основные виды и условия разработки стратегии развития предприятия. В современных условиях хозяйствования, связанных с включением предприятий машиностроительной отрасли в процессы глобализации мировой экономики, целесообразно выделить следующие виды стратегий:

- **интеграционная**, которая предусматривает тесную кооперацию и интеграцию с другими организациями, заинтересованными в производстве и реализации конечного продукта. Создание кластерных структур на региональном, национальном, транснациональном, отраслевом и межотраслевом уровнях позволит более успешно решать вопросы производственной и коммерческой деятельности. В рамках кластерных структур можно развивать как горизонтальные, так и вертикальные связи с другими субъектами хозяйствования, научными и образовательными центрами, торговыми организациями;

- **диверсификационная**, реализуемая посредством диверсификации различных видов деятельности предприятий машиностроения, включая производство новых видов продукции, машин, станков, оборудования и механизмов, транспортных средств и иной техники, пользующихся спросом на внутренних и внешних рынках, а также оказание услуг, связанных с эксплуатацией, техническим ремонтом и обслуживанием. На машиностроительных предприятиях может быть организовано производство бытовой техники и приборов, другой продукции широкого потребления;

- **инновационная**, в соответствии с которой осуществляется поэтапный переход на выпуск инновационной продукции соответствующей IV и V технологическим укладам, конкурентоспособной на внутреннем и мировом рынках, не уступающей мировым образцам. Данная стратегия требует использования новейших отечественных и зарубежных технологий, в том числе гибких автоматизированных технологических линий, нанотехноло-

гий и наноматериалов. Эта стратегия позволит осуществить комплексную модернизацию производства, импортозамещение на внутреннем рынке, занять предприятиям машиностроения лидирующие позиции на мировом рынке, значительно расширить географию сбыта своей продукции, осуществить рыночную экспансию за счет ее более высоких конкурентных преимуществ.

Из трех вышеназванных стратегий развития предприятий машиностроительного комплекса инновационная стратегия, безусловно, обладает существенным преимуществом перед иными стратегиями. В то же время она обладает определенными особенностями и рисками, связанными с влиянием факторов внешней и внутренней среды.

Особенности факторов и рисков внешней и внутренней среды, влияющих на корректировку стратегии инновационного развития предприятий машиностроения, следующие:

факторы и риски внешней среды:

- изменения конъюнктуры мирового рынка продукции машиностроения;
- отрицательное влияние глобального финансово-экономического кризиса на развитие отечественного машиностроения;
- повышение цен на импортируемое сырье, материалы, комплектующие и энергоносители;
- технологическое отставание отечественных предприятий машиностроения от мировых брендов;
- влияние транснациональных корпораций на динамичное развитие экспортного потенциала отечественных предприятий;
- ограничения в использовании передовых зарубежных технологий для модернизации отечественных предприятий;
- неравные экономические условия деятельности субъектов хозяйствования в рамках единого таможенного и экономического пространства Беларуси, России и Казахстана;
- нарушение внешними поставщиками сроков реализации договоров с предприятиями машиностроения;
- неразвитость товаропроводящей сети и сервисных центров на внешних рынках;

факторы и риски внутренней среды:

- неадекватный реальным потребностям рынка, тенденциям научно-технического и технологического развития выбор миссий и инновационных стратегий отдельных предприятий;
- недостаточный уровень подготовки инновационных проектов по комплексной модернизации предприятий машиностроения;

- дефицит профессиональных компетентных кадров рабочих и специалистов в области новых и высоких технологий;
- низкая эффективность системы непрерывного повышения квалификации и переподготовки кадров на предприятиях машиностроения;
- невысокий уровень инновационной активности значительной части персонала предприятий;
- дефицит финансовых средств, сырья и новых материалов для реализации проектов;
- неполное соответствие структуры управления разработанной стратегии инновационного развития;
- слабое информационное и научное сопровождение инновационных проектов;
- бюрократические преграды по разработке и согласованию проектно-сметной документации;
- отсутствие мотивации и реальных стимулов инновационной деятельности для некоторых категорий персонала предприятий;
- несовершенство нормативной правовой базы инновационной деятельности и инновационного развития предприятий реального сектора экономики.

Вышеперечисленные факторы и риски внешней и внутренней среды могут быть преодолены с помощью универсальной стратегии конкурентных преимуществ на основе лидерства, концептуальные основы которой разработал М. Портер. В соответствии с данной концепцией определяются масштабы конкуренции на внутренних и внешних рынках, основные преимущества перед конкурентами, формы их проявления и факторы экономии на предприятии. В рамках инновационной стратегии машиностроительных предприятий должна быть определена иерархия конкретных целей и задач для всех его подразделений, источники финансирования и стимулирования инновационной деятельности, а также персонификация конкретных мероприятий по ее выполнению и налажен системный мониторинг.

СОДЕРЖАНИЕ

ВОЙТОВ И.В. Инновационная политика Республики Беларусь на период до 2020 г.	3
ГОРДИЕНКО А.И. Новые импортозамещающие и ресурсосберегающие материалы для промышленности	6
ПОПОК Н.Н., ДАНИЛОВ В.А. Мобильное производство с интенсификацией механической обработки поверхностей деталей машин	12
БАРЧЕНКО В.Т., ВЕРЕСОВ Л.П., ВЕРЕСОВ О.Л. Технологический кластер для модификации поверхности потоками заряженных частиц и плазмы	15
БОГАТЫРЁВА В.В. Необходимость оценки человеческого капитала машиностроительной отрасли Республики Беларусь	18
КОСАРЕВ В.А. Моделирование системы процесса планетарного формообразования отверстий	21
АВЕРЧЕНКОВ В.И., АВЕРЧЕНКОВ А.В. Построение единого информационного пространства малых инновационных машиностроительных предприятий	24
РУДЫЙ В.В., АНТОНЮК В.Е., ДЕЧКО Э.М. Технологическая наследственность при изготовлении фрикционных дисков	27
ИВАНОВ И.А. Проблемы проектирования вакуумных систем технологических установок	30
МРОЧЕК Ж.А. Износостойкость покрытий, сформированных электромагнитной наплавкой	33
КЛУБОВИЧ В.В., КУЛАК М.М., ХЛОПКОВ Ю.В. Протекание процесса СВС под действием лазерного излучения	36
КАСТРЮК А.П. Техническое состояние деталей ремонтного фонда двигателей	39
РУДЕНСКАЯ Н.А., СОКОЛОВА Н.В., ЧОЙ К.Й., НОВОСЕЛОВ А.В., РУДЕНСКАЯ М.В. Использование сверхзвуковой плазмы для получения покрытий на основе тугоплавких соединений	42
КЛИМЕНКО С.А., МЕЛЬНИЙЧУК Ю.А., МАНОВИЦКИЙ А.С., МАНОХИН А.С. Высокоэффективное «твердое» точение деталей из труднообрабатываемых сплавов	45

КУПТЕЛЬ В.Г. КАШТАЛЬЯН И.А., ШЕЛЕГ В.К. Силы резания при вибрационном точении	48
БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю. Развитие теории технологического наследования качества поверхностного слоя деталей машин	50
ЗДОР Г.Н., ТИМОШЕВИЧ В.Б., СЕВЕРИН И.Н. Диагностика ГТУ по спектрам модуляций их радиоизлучения в реальном масштабе времени	53
РУСЕЦКИЙ В.Н., АНТОНЮК В.Е., ДЕЧКО Э.М. Исследование показателей шума и параметров измерительного межосевого расстояния конических зубчатых передач	56
ОПАРИНА И.Б., КОЛМАКОВ А.Г. Измерительная система пленки	59
МРОЧЕК Ж.А., ХАРЧЕНКО В.В. Тенденции развития электрофизических способов обработки материалов	61
ЛОГВИН В.А., МРОЧЕК Ж.А., ЧЕРНОВ А.С. Ионно-плазменная обработка поверхностей деталей	64
СИНЬКЕВИЧ Ю.В., ГРИНЕВИЧ А.А., ЯНКОВСКИЙ И.Н. Исследование механизма формирования топографии поверхности в процессе электроимпульсного полирования	67
СИНЬКЕВИЧ Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования на микротвердость поверхности стали	70
БЕЛЫЙ А.В., КУКАРЕКО В.А., ПОПОК Н.Н., ДЕРБУШ С.В., РАКЕЛЬ Е.И. Структурное состояние и свойства обработанного ионами азота сплава Fe ₃ Al	73
ВИТЯЗЬ П.А., СЕНЮТЬ В.Т., ВАЛЬКОВИЧ И.В., ХЕЙФЕЦ М.Л. Производство инструментов из наноструктурных сверхтвердых материалов	77
ГОРДИЕНКО А.И., ИВАШКО В.В., ВЕГЕРА И.И., МИХЛЮК А.И., ХАЙТИН И.А. Создание новых высокопроизводительных промышленных технологий и оборудование индукционного нагрева	81
БАРЧЕНКО В. Т., ГОНЧАРОВ В.Д., РЕПЕЕВА Д. М., ЛИСЕНКОВ А. А. Физическое воздействие катодного пятна вакуумной дуги на поверхность	84
ПОПОК Н.Н., ХМЕЛЬНИЦКИЙ Р.С. Высокоскоростная обработка сферических поверхностей деталей	87
ДАНИЛОВ В.А., КИСЕЛЁВ Р.А. Формообразование линейчатых поверхностей энергетическим лучом	89

ПОПОК Н.Н., МАМОНОВ Н.В., МАМОНОВ Д.Н. Уменьшение материалоемкости технологического оборудования путем использования тонкостенных спиральных труб	92
АНТОНОВИЧ Д.А., ЗАЛЕССКИЙ В.Г. Применение плазменных источников электронов при повышенных давлениях в рабочей камере	95
КИРИЕНКО А.С. Технология и оборудование для получения эластичного инструмента с ориентированными зернами абразива	98
КИРИЕНКО А.С., ЗАВИСТОВСКИЙ С.Э. Технология и оборудование для пневмодинамического упрочнения коленчатых валов ДВС	102
КАРАСЬ И.К. Теплообразование при шлифовании зубьев колес методом обката	104
СТЕПАНКИН И.Н., ПОЗДНЯКОВ Е.П., КЕНЬКО В.М., КАМКО А.И. Контактная усталость инструментальных сталей	108
ЛЫСОВ А.А., АРШИКОВ А.С. Влияние структурно-топографических особенностей режущего слоя алмазного инструмента на эффективность финишной обработки	112
АКУЛОВИЧ Л.М., СЕРГЕЕВ Л.Е., БАБИЧ В.Е., СЕНЧУРОВ Е.В., ПАДАЛЯК В.В. Магнитно-абразивная обработка конических поверхностей деталей машин	116
ДОЛГИХ А.М., КРУГЛИК В.А. Изменение свойств твердосплавных пластин нанесением карбидных слоев	118
ДАНИЛОВ В.А., КИСЕЛЁВ Р.А., ЯЛОВСКИЙ О.В. Прогрессивные способы обработки торцовых зубчатых контуров	121
ДАНИЛОВ В.А., ЧЕПУРНОЙ А.А. Обработка каналовых винтовых поверхностей	124
ДАНИЛОВ В.А., КОСТЮЧЕНКО А.И., МАСАЛЬСКИЙ Ю.Ю., СЕЛИЦКИЙ А.Н. Способы обработки профильных моментопередающих поверхностей на универсальных станках	127
ПЕТРЕНКО К.П. Экспериментальные исследования формирования программ нагружения в процессах резания	130
ДЕЧКО Э.М., ВОРОНОВИЧ А.В. Влияние сил резания на деформации и напряжения в шнековых сверлах	133
БЕЛЯКОВ Н.В., ОЛЫШАНСКИЙ В.И., МАХАРИНСКИЙ Ю.Е., ПОПОК Н.Н. Методическое обеспечение САПР ТП изготовления корпусных деталей в станкостроении	136

МИРОШИН И.В. Проектирование упрочняющего технологического процесса с учетом явления технологического наследования	139
ЗАВИСТОВСКИЙ В.Э. Технологическая наследственность материала восстановленной детали	142
ДАНИЛОВ В.А., КИСЕЛЁВ Р.А., КРУТЬКО В.С. Агрегатно-модульное построение технологического оборудования с источниками концентрированной энергии	145
ВЕРЕМЕЙЧИК А.И., САЗОНОВ М.И., ХВИСЕВИЧ В.М. Плазмотрон для плазменного упрочнения участков и кромок деталей, подверженных износу	148
ГАФО Ю.Н., СОСНОВСКИЙ И.А., КУРИЛЁНОК А.А. Разработка технических средств для автоматизации контроля и регулирования режимов центробежного индукционного припекания	151
ТКАЧЕНКО В.В., ШУЛЯК В.В., КАНДЕЛИНСКИЙ С.Л., КУЗНЕЧИК О.О. Фотобарьеры в системах управления промышленным оборудованием по обработке металлов давлением	154
ОМЕСЬ Д.В., ГОРБУНОВ В.П. Моделирование термоупругих процессов стойки консольно-фрезерного станка	157
ЗАВАЛЬНЮК В.М., КАПСАРОВ А.Г., ШУМИЛОВ В.Н. Моделирование микродинамики опорного аппарата	159
КУЗНЕЧИК О.О., ТКАЧЕНКО В.В., ШУЛЯК В.В., КАНДЕЛИНСКИЙ С.Л. Использование последовательного интегрально-дифференциального регулятора в системе управления порошковой электроконтактной наплавкой	162
ПОБЕРЕЖНЫЙ С.В., СТЕФАНОВИЧ А.А., КУЗНЕЧИК О.О., ФИЛИППОВ О.А. Перспективы применения химико-термической и импульсно-плазменной обработка в производстве втулок буровых насосов	164
АРШИКОВ А.С., ЛЫСОВ А.А., ГАФО Ю.Н. Получение композиционных инструментальных материалов с повышенной концентрацией алмазов	167
СЕДЮКЕВИЧ В.Н., КАПСКИЙ Д.В. Методологические вопросы подготовки специалистов транспортного комплекса	170
КОРЕНСКИЙ В.Ф. Методическое обеспечение курсового проектирования по дисциплине «Теория механизмов, машин и манипуляторов»	173
ТУРИЩЕВ Л.С. Об организации контроля успешности обучения студентов технических специальностей	176

КРЫЛЕНКО А.В. Как поднять престиж аспирантуры по машиностроительным специальностям	179
СПИРИДОНОВ Н.В., СОКОРОВ И.О., ПИЛЕЦКАЯ Л.И., ДОМАШ Е.В., БУЗУН Е.Л. Требования к газотермическим покрытиям при использовании концентрированных потоков энергии	181
СОКОРОВ И.О., СПИРИДОНОВ Н.В., ВОЛОДЬКО А.С. Исследование физико-механических свойств газотермических покрытий, применяемых для упрочнения деталей легкой промышленности	185
ДЕВОЙНО О.Г., КАРДАПОЛОВА М.А., ЛУЦКО Н.И., КОВАЛЬЧУК А.А., ЛАПКОВСКИЙ А.С. Влияние режимов лазерной наплавки на состав покрытия из сплава на основе никеля	188
АКУЛОВИЧ Л.М., МИРАНОВИЧ А.В., ЛИННИК А.В., ЕФИМОВ А.М. Влияние характера магнитного поля на процесс магнитно-электрического упрочнения	193
ПАРШУТО А.Э., АЛЕКСЕЕВ Ю.Г., НИСС В.С., КОРОЛЁВ А.Ю., СЛЕПНЁВ Г.Е. Разработка установки для микродугового оксидирования сплавов алюминия и титана	196
ВЛАСОВЕЦ А.М., ЛЕБЕДЕВ В.Я. Технологии восстановления шнеков экструдеров сельскохозяйственной и пищевой промышленности	199
ЛЕМЗИКОВ А.В., КУНДАС С.П., МЕДВЕДЕВ С.В., ГУСЕВ С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния деталей в процессе эксплуатации с учетом режимов закалки	202
ВАЛЬКО Н.Г., КУРГУЗЕНКОВА И.И. Элементный состав сплавов Zn-Ni, электроосажденных в поле рентгеновского излучения	205
АНДРУШЕВИЧ А.А., УШЕРЕНКО С.М., ТОЛОЧКО Н.К. Динамическое упрочнение литых деталей машин	208
КУЗЬМИН В.И., РУДЕНСКАЯ Н.А., СОКОЛОВА Н.В., МИХАЛЬЧЕНКО А.А., КАРТАЕВ Е.В. Исследование покрытий, сформированных при кольцевой транспортировке частиц в поток плазмы	213
ПОБЕРЕЖНЫЙ С.В., КУЗНЕЧИК О.О., ДОКТОРОВ В.В., ТРУБИЦИН Г.А. Электроимпульсное упрочнение твердосплавного материала на основе карбида вольфрама	216
ВИГЕРИНА Т.В. Упрочнение шеек коленчатых валов поверхностным пластическим деформированием	218

ИШИН Н.Н., ГОМАН А.М., АДАШКЕВИЧ В.И., СКОРОХОДОВ А.С., НАТУРЬЕВА М.К. Методология оценки технического состояния трансмиссионных систем мобильных машин в условиях эксплуатации	220
СУХОЦКИЙ П.Г., ШЕЛЕГ В.К., БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А. Формирование стальных износостойких покрытий газопламенным напылением с ультразвуковой активацией	224
СУХОЦКИЙ П.Г., ШЕЛЕГ В.К., ЛЕВАНЦЕВИЧ М.А. Экспериментальная оценка амплитуды колебаний проволоки при газопламенном напылении с ультразвуковой активацией	226
ШТЕМПЕЛЬ О.П., ФРУЦКИЙ В.А. Материаловедческие особенности формирования композиционного материала на основе металлоотходов	230
ПАНТЕЛЕЕНКО Ф.И., ОКОВИТЫЙ В.А., ПАНТЕЛЕЕНКО А.Ф. Разработка композиционных материалов на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки для газотермического напыления	233
ЖОРНИК В.И., БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А., ЛЕВАНЦЕВИЧ М.А., КАМКО А.И. Повышение работоспособности элементов трибосопряжений с металлическими покрытиями фрикционным модифицированием	236
ОКОВИТЫЙ В.А. Создание градиентных плазменных покрытий на основе диоксида циркония	239
АКУЛОВИЧ Л.М., ЕФИМОВ А.М., ЛИННИК А.В., ХЕЙФЕЦ М.Л. Влияние ультразвука на процессы упрочнения и обработки деталей машин в магнитном поле	241
ОБРАЗЦОВ Л.Н. Повышение контактной долговечности подшипников качения на основе учета применения смазочных материалов с наноструктурными алмазами	244
ОСТАНИН О.А. Структурно-аналитическая модель акустико-эмиссионного контроля на стадиях жизненного цикла изделий с учетом технологического наследования	247
СМИРНОВ А.Н., КНЯЗЬКОВ В.Л., АБАБКОВ Н.В. Восстановление мостиков трубной решетки барабанов котлов высокого давления ...	251
ЧЕРНЕВИЧ К.В. Особенности восстановления корпусных деталей из алюминиевых сплавов	254
ЯРОШЕВИЧ В.К., ГУЦ А.И. Технологии электроконтактного восстановления сложнопрофильных поверхностей деталей машин	257

ЯРОШЕВИЧ В.К.	
Восстановление тонкостенных деталей автомобильных двигателей	259
КАСТРЮК А.П., ИВАНОВ В.П.	
Утилизация нефтесодержащих отходов ремонтного производства	262
МОЗАЛЕВСКИЙ Д.В., АРТЮШЕВСКАЯ Н.В.	
Анализ дорожного движения и транспортно-пешеходной нагрузки в городе Новополоцке	265
АНДРУШ В.Г.	
Селективное установление продолжительности обкатки двигателей	268
ЗАВИСТОВСКИЙ С.Э.	
Технология и оборудования дуговой наплавки крупногабаритных деталей литейных пресс-форм сложной геометрической формы	271
ЗАВИСТОВСКИЙ В.Э.	
Надежность деталей машин с повреждениями	275
МУРАШОВА И.В., ГУБКО А.Д., ОЛЕШУК И.Г., ПОБОЛЬ И.Л.	
Тонкопленочные упрочняющие покрытия на деревообрабатывающем инструменте. Трибология и характер износа инструмента в процессе резания	277
РУДАК Д.П., МАКАРОВ В.Ю., ШТЕМПЕЛЬ О.П.	
Влияние механического воздействия на сварочную ванну при сварке легированных сталей	280
ДУДАН А.В.	
Повышение надежности эксплуатации задвижек запорной арматуры методом горизонтальной электрошлаковой наплавки	282
ЮШКЕВИЧ Д.В., ГУБКО А.Д., ОЛЕШУК И.Г., ПОБОЛЬ И.Л.	
Электронно-лучевая сварка ТВЭЛов	284
ИВАНЬКОВИЧ А.А., ЛИСОВСКИЙ А.Л.	
Моделирование процесса литья чугуна в условиях ОАО «Технолитполоцк»	287
УВАРОВ Г.А.	
Нечеткая логика в виброакустическом диагностировании автомобилей	290
САПЁЛКИН В.Е.	
Особенности разработки и реализации стратегии инновационного развития машиностроительных предприятий	293

Научное издание

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Материалы международной научно-технической конференции,
посвященной 35-летию машиностроительного факультета
Полоцкого государственного университета
(Новополоцк, 19 – 20 октября 2011 г.)

Текст печатается в авторской редакции

Ответственный за выпуск *Р. С. Хмельницкий*

Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

Подписано в печать 13.10.2011. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 17,62. Уч.-изд. л. 16,8. Тираж 70 экз. Заказ № 1759.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.