



Ассоциация технологов-машиностроителей Украины
Академия технологических наук Украины
Институт сверхтвердых материалов
им. В.Н. Бакуля НАН Украины
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
Союз инженеров-механиков НТУ Украины «КПИ»
ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» (Украина)

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта
ОАО «Ильницкий завод МСО» (Украина)

Белорусский национальный технический университет
ГНПО «Центр» НАН Беларуси

Ассоциация инженеров-трибологов России

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

Издательство «Инновационное машиностроение» (Россия)

Каунасский технологический университет (Литва)

Машиностроительный факультет Белградского университета (Сербия)

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ

*Материалы 20-й Международной
научно-технической конференции*

01–05 июня 2020 г.

Киев – 2020

Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 20-й Международной научно-технической конференции, 01–05 июня 2020 г. – Киев: АТМ Украины, 2020. – 179 с.

Научные направления конференции

- Научные основы инженерии поверхности:
 - материаловедение
 - физико-химическая механика материалов
 - физикохимия контактного взаимодействия
 - износо- и коррозионная стойкость, прочность поверхностного слоя
 - функциональные покрытия и поверхности
 - технологическое управление качеством деталей машин
 - вопросы трибологии в машиностроении
- Технология ремонта машин, восстановления и упрочнения деталей
- Метрологическое обеспечение ремонтного производства
- Экология ремонтно-восстановительных работ
- Сварка, наплавка и другие реновационные технологии на предприятиях горнометаллургической, машиностроительной промышленности и на транспорте

Материалы представлены в авторской редакции

© АТМ Украины,
2020 г.

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
Брянский государственный технический
университет, Брянск, Россия

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В иерархии производственных систем (ПС) принято выделять следующие структурные уровни: предприятие, цех, участок, рабочее место, технологическое оборудование. Естественно, что ключевое место в этой иерархии занимает участок и нижестоящие уровни, то есть обрабатывающие ПС, в которых предметы производства имеют исходное состояние в виде цельных заготовок.

При этом рассматривать целесообразнее всего механообрабатывающие ПС, как наиболее распространенные, однако их модели при соответствующей интерпретации будут пригодны и для других обрабатывающих ПС, для изготовления деталей путем соединения частей (сварка) или частиц (консолидация порошка), а также путем образования из жидкой фазы (литье, полимеризация) с точки зрения имитационного моделирования. Обрабатывающие ПС преобразуют предметы из состояния заготовок в состояние деталей требуемого качества, в нужном количестве и разнообразии, с заданными или минимальными затратами регламентированных ресурсов. Ресурсы могут быть финансовыми, временными, материальными, трудовыми, энергетическими, информационными. На рис. 1 представлены различные виды ПС.

Интерес представляет функциональная эффективность ПС, прежде всего гибкость и производительность. Качество изготовления при моделировании также необходимо учитывать, в виде процента брака, т.е. дополнительных работ по исправлению или восстановлению бракованных деталей.

Непосредственное изменение состояния предметов производства, т.е. преобразование материалов и заготовок в детали происходит в ходе технологического процесса (ТП).

ТП отличаются большим разнообразием однако их производственно-временная структура состоит из одних и тех же элементов.

Укрупнено структуру ПС при имитационном моделировании успешно можно представить тремя группами элементов: объекты

воздействия (ОВ), средства воздействия (СВ) и производственный персонал (ПП).



Рис. 1 – Виды ПС

Чтобы перекрыть действующие в ПС основные аспекты и факторы, в ее комплексной модели необходимо иметь, как минимум, четыре частные модели.

В ПС налицо все признаки, позволяющие отнести их к категории «сложные системы». Для имитационного моделирования ПС необходимо привлекать методологию системного анализа.

Структуры моделей функционирования различных систем можно представить следующим выражением:

$$Y(t) = F(X, Z, A, E, U, t),$$

где Y – вектор выходных характеристик; X – вектор входных воздействий; Z – вектор собственных внутренних воздействий; A – вектор внутренних параметров; E – вектор возмущающих воздействий внешней среды; U – вектор управляющих воздействий; t – время.

Вообще модель должна строиться под определенную задачу, а не воспроизводить ПС с учетом различных многообразных нюансов. Ошибкой является попытка моделировать ПС во всех подробностях, полагая, что от этого модель становится совершеннее, т.к. приближается к оригиналу.

При разработке имитационной модели ПС первостепенное значение имеет не выбор метода и математического аппарата, а так же тщательная проработка постановочной части.

Разработка имитационной модели ПС должна вестись поэтапно. Начинать нужно с простой модели и постепенно ее усложнять – добавлять факторы, элементы, состояния и переменные, переводить константы и параметры в переменные, заменять детерминированные величины случайными, снимать ограничения, отказываться от допущений и т.д.

Для объектов, относящихся к категории сложных систем, к которым относятся и ПС, имитационное моделирование объективно необходимо, что обусловлено их сложностью, высокой стоимостью, уникальностью и недоступностью для натурального эксперимента [1].

Литература

1. Аверченков, В.И. Характеристика моделируемых производственных систем в машиностроении / В.И. Аверченков, В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов. – Тез. междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века». – Севастополь, 2019. – С. 6–9.

Агеев М.С. Херсонская государственная морская академия, Херсон,
Рутковский А.В. Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев,
Соловых Е.К., Катеринич С.Е. Центральноукраинский НТУ, Кропивницкий, Украина
Белоцерковский М.А. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ АЗОТИРОВАНИЕМ

Из многообразия способов нанесения упрочняющих защитных покрытий (УЗП) наиболее распространенными технологиями, используемыми при повышении эксплуатационных свойств деталей, являются методы газотермического напыления (ГТН), среди которых самым дешевым и простым методом является метод электродугового напыления (ЭДН) [1, 2]. Несмотря на большое количество разработок специалистов по ЭДН (Ю.С. Борисов, ИЭС НАН Украины, М.М. Студент, ФМИ НАН Украины, М.А. Белоцерковский ОИМ

НАН Беларуси, зарубежных фирм Метко и Кастолин, других научных центров), в настоящее время исследования развиваются по усовершенствованию этой технологии и оборудования. [1, 3].

Главные недостатки напыленных покрытий – низкая прочность сцепления из-за значительной пористости, недостаточно высокая износостойкость и микротвердость из-за выгорания углерода и легирующих элементов при напылении [1, 2]. Существенное повышение свойств покрытий, полученных ЭДН, возможно путем сочетания ЭДН с лазерной (ЛО), ультразвуковой (УЗО), электроискровой (ЭИЛ), электронно-лучевой (ЭЛО) и др. методами обработки [4, 5]. Эффективным путем решения задачи повышения эксплуатационных характеристик покрытий, полученных ЭДН, является формирование в них высокопрочных поверхностных слоев методами химико-термической обработки (ХТО) [4, 6]. В попытках повышения свойств покрытий, полученных ЭДН, отмечают преимущество такого вида ХТО, как азотирование, который отличается технологичностью, экологической безопасностью и экономической эффективностью [7–10]. Объединение нанесения покрытий ЭДН с их обработкой азотированием позволяет создать комбинированный метод инженерии поверхности.

С целью обоснования и доказательства целесообразности разработки технологий формирования УЗП на основе сочетания процесса ЭДН с азотированием (А), в частности, импульсным ионным азотированием (ИИА), нами были проведены исследования. Так, микротвердость ЭДН-покрытиях из стали мартенситного класса 40Х13 и аустенитного класса 12Х18Н10Т после обработки ИИА составляла от 5600 до 12000 МПа (табл. 1). Твердость не азотированной сердцевины напыленных слоев стали 40Х13 и 12Х18Н10Т сохраняется на уровне исходных значений.

Таблица 1 – Влияние температуры ИИА на микротвердость покрытий, полученных электродуговым напылением

Материал покрытия	Микротвердость, ГПа при T, K ИИА						
	600	620	650	670	700	720	770
Стали мартенситного класса	8,6	11,3	12,9	14,0	15,9	12,7	11,3
Стали аустенитного класса	5,6	6,2	8,0	8,9	11,1	12,0	11,8

Согласно полученным данным, по мере увеличения температуры ИИА покрытий возрастает глубина модифицированного слоя (до

90 мкм). Азотирование напыленных покрытий из сталей аустенитного класса приводит к образованию модифицированных слоев толщиной до 40–50 мкм. Микротвердость напыленного слоя увеличивается в результате обработки азотированием и при 670–720 К достигает максимальных значений (14000–15900 МПа). Основными фазами, присутствующими в модифицированных азотом напыленных слоях из стали мартенситного класса (40X13), являются нитриды ε -(Fe,Cr)₃N и γ' -Fe₄N.

Отличительной чертой азотированных слоев на покрытии, полученных ЭДН является присутствие в них частиц фазы α'' -(Fe,Cr)₈N, а также пониженное содержание в них нитридной фазы γ' -Fe₄N и относительно более высокое содержание нитрида CrN. Повышенная диффузионная проницаемость покрытий вызвана высокой концентрацией содержащихся в них дефектов (вакансий, дислокаций, пор), которые образовались в условиях сверхбыстрой кристаллизации капель расплава в процессе ЭДН. При этом, присутствие термодинамически стабильного легированного хромом оксида Fe₃O₄ в виде пленок, разделяющих напыленные частицы, затрудняет диффузионный перенос азота от верхнего слоя частиц к нижележащим слоям. Наибольшая глубина азотирования достигается в напыленных покрытиях при пониженном содержании оксидных пленок.

Основной причиной, обуславливающей небольшую глубину насыщения азотом напыленных покрытий (15–30 мкм) является наличие оксидных пленок в покрытии. Оксиды образуются как во время полета расплавленных частиц, так и в процессе их кристаллизации на поверхности детали. По этой же причине покрытия, имеющие пористость более 7–14% практически невозможно упрочнить без образования дефектных участков, поскольку поверхность пор покрыта тонким слоем оксидов железа.

Устранить образование оксидных пленок возможно при распылении стальных проволок продуктами сгорания пропана и воздуха. В течение последующего нагрева до достижения температуры азотирования, которая находится в пределах 530–640 К в зависимости от марки стали, происходит процесс упрочнения и унос газообразных продуктов в вакууме. Таким образом, изменяя температуру процесса азотирования, соотношения потенциалов азота можно управлять глубиной диффузионного слоя и твердостью напыленных покрытий.

Исследование микротопографии поверхностей слоев напыленных покрытий после азотирования показало, что пористость покры-

тий отрицательно сказывается на их качестве. Установлено, что на напыленных слоях пористостью более 7% после азотирования на поверхности появляются участки вспучивания (вздутия) покрытия размером до 200–500 мкм. Очевидно, что чем больше пористость слоев, тем сильнее проявляется эффект вспучивания. Поэтому покрытия формировали распылением проволоочных сталей 40X13 и 12X18Н10Т продуктами сгорания пропана и воздуха, а не распылением воздухом, что обеспечивало пористость покрытий менее 7%. Проведенные исследования показали, что при плотности напыленных слоев более 94% данный эффект не возникает.

Рост прочности сцепления характерен для покрытий, имеющих пористость в диапазоне 5–14 %, дальнейшее повышение пористости приводит к снижению адгезии (табл. 2). Повышение адгезии покрытий, полученных ЭДН с последующим азотированием, обусловлено развитием диффузионных процессов на границе между покрытием и подложкой, восстановлением окислов на поверхности подложки, релаксацией внутренних напряжений в покрытии.

Таблица 2 – Влияние пористости на прочность сцепления ЭДН-покрытий (без нанесения подслоя)

Материал покрытия	Прочность сцепления (МПа) при различной пористости (%)					
	≤ 4	5–9	7–10	10–14	12–16	13–17
40X13	37	43	55	47	43	35
	41	55	67	63	50	39

Выводы. Проведены исследования с целью повышения свойств покрытий, полученных ЭДН сталей мартенситного и аустенитного классов, их обработкой азотированием и формированием УЗП на основе сочетания процесса ЭДН и азотирования.

Дана оценка целесообразности повышения свойств покрытий, полученных ЭДН из сталей мартенситного (40X13) и аустенитного (12X18Н10Т) классов, путем последующей их обработки азотированием. Исследован фазовый состав и микротвердость покрытий, полученных распылением проволок из сталей аустенитного и мартенситного классов. В результате исследований влияния азотирования на физико-механические свойства стальных напыленных покрытий установлено, что для эффективности процесса азотирования необходимо, чтобы покрытия имели пористость не более 7 %, что обеспечивает образованию диффузионного слоя толщиной 40-50 мкм, микротвер-

достью 6500–15000 МПа. При этом прочность сцепления покрытий увеличивается в 1,6 раза, а износостойкость в 2,5–5 раз.

Показано, что комбинированная технология, сочетающая ЭДН и азотирование, позволяет получить значительный эффект по повышению свойств напыленных покрытий при снижении вероятности деформации детали. Процесс нанесения покрытий не создает сплошного нагрева детали, а обеспечивает нагрев только поверхностного слоя на необходимую для упрочнения глубину. Азотирование не изменяет форму, размеры детали и шероховатость ее поверхности, поэтому его можно использовать в качестве финишной обработки. В связи с изложенным и дальнейшей необходимостью проведения исследований комбинированного метода инженерии поверхности, сочетающего электродуговое напыление с азотированием.

Литературы

1. Ильющенко, А.Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек. – Мн. : Беларуская навука, 2002. – 245 с.

2. Бороненков, В.Н. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности / В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов – Екатеринбург : УрГУ, Унив. изд-во, 2012. – 267 с.

3. Студент, М.М. Розробка захисних та відновних електрометалізаційних покриттів з використанням порошкових дрітків / М.М. Студент: автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Львів ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 1998. – 18 с.

4. Витязь, П.А. Упрочнение газотермических покрытий / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский. – Мн. : Бестпринт, 2004. – 192 с.

5. Лопата, Л.А. Повышения качества напыленных покрытий / Л.А. Лопата, Н.А. Медведева, Т.М. Туник, С.Г. Салий // Мир техники и технологий – 2005. – №8 (54). – С. 54–56.

6. Витязь, П.А. Повышение качества газотермических покрытий из проволочных материалов методами химико-термической обработки / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 6. – С. 666–672.

7. М.А. Белоцерковский. Упрочнение химико-термической обработкой покрытий, полученных высокоскоростным распылением стальных проволок / М.А. Белоцерковский, В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Инженерия поверхности. Новые порошковые ком-

позиционные материалы. Сварка: сб. докл. Международ. симпозиума, 25–27 марта, 2009 г. – Мню : ГНПО ПМ НАН Беларуси, ОИМ НАН Беларуси, 2009. – С. 178–184.

8. Ляшенко, Б.А. Газотермическое напыление и ионное азотирование – перспективное сочетание / Б.А. Ляшенко, М.А. Белоцерковский, В.Н. Лопата и др. Инженерия поверхности и реновация изделий: мат. 14–й Междун. науч.-техн. конф., 2–6 июня 2014, г. Свалява. – К : АТМ Украины, 2014. – С.79–80.

9. Ageev, M. Of combined electric arc coatings. International scientific / M. Ageev, L. Lopata, T. Smirnova, A. Dudan // J. Prombles of Tribology. – 2019. – Vol. 24, № 3/93. – P. 56–61.

Базров Б.М. Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Чижи́к С.А. Институт тепло- и массообмена
им А.В. Лыкова НАН Беларуси,

Хейфец М.Л. Институт прикладной физики НАН Беларуси,

Грецкий Н.Л. ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержит техническое задание конкретного заказчика, включающее:

1. *Данные о материалах и готовых изделиях.*
2. Производительность оборудования, характер и тип производства.
3. Уровень автоматизации и встраиваемость в современное производство.

Последовательность расчета технологического оборудования для традиционного производства включает укрупненные стадии:

1. Компоновка (выбор кинематической схемы).
2. *Модульное построение* (ограничительный набор агрегатов, узлов).
3. Расчеты статических упругих перемещений (выбор схемы и прочностные расчеты).

4. Динамические расчеты устойчивости движений системы и статических отклонений элементов (выбор схемы и динамические расчеты).

5. Тепловые расчеты (выбор термодинамической схемы и расчет температур).

6. Точностные расчеты (определение точности геометрических и кинематических связей с учетом деформации).

7. Расчеты надежности (определение надежности агрегатов и узлов, экономическое обоснование надежности).

8. *Анализ человеко-машинной системы* (охрана труда и техника безопасности).

Далее по стадиям производится расчет основных систем технологического оборудования:

- несущих систем;
- направляющих движений;
- приводов движений и др.

Проектирование и расчет основных систем технологического оборудования производится по техническим требованиям к механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации; системам смазки, электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности, эргономики и технологичности станка.

Для этого в первую очередь строятся схемы (согласно нумерации стадий): кинематическая (1), прочностная (3), динамическая (4), термодинамическая (5), контакта и трения (6), изнашивания и надежности (7). Построение ведется как с учетом ограничительного набора агрегатов и узлов – по модулям (2), так и на базе анализа человеко-машинной системы (8) в целом.

Однако, при проектировании технологического оборудования для восстановления деталей в ремонтном производстве, этих стадий и соответствующих им схем недостаточно. Связано это с тем, что для восстановления, заключающегося в послойном наращивании поверхности изделий, требуется дополнительно рассматривать схемы и выделять модули технологического оборудования, описывающие подвод материала и энергии. Так как, восстановление формы изделия происходит путем добавления материала, с использованием концентрированных источников энергии и распределенных полей, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении «лишнего» материала.

Широко применяемые в мировом производстве методы восстановления позволяют заключить, что наиболее перспективно применение технологического оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру импульсов подачи энергии и материала.

Если рассматривать технологическое оборудование с позиций компьютеризации производственной деятельности, то такое оборудование, его узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ. Поэтому, требуется также изучать схемы числового программного управления, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, рассматривая комплекс технологического оборудования как мехатронную систему.

Таким образом, при проектировании технологического оборудования для восстановления деталей в ремонтном производстве применяются как методы и схемы формообразования деталей из композиционных материалов, построенные на использовании потоков энергии и компонентов материала, так методы и схемы автоматизации и компьютерного управления процессами производства и ремонта изделий.

*Береснев В.М. Харківський національний
університет ім. В.Н. Каразіна, Харків
Клименко С.А., Конєйкіна М.Ю., Манохін А.С.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України, Київ, Україна*

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Механічна обробка важкооброблюваних вуглецевих сталей високої твердості, а також складнолегованих сплавів характеризується низькою продуктивністю процесу різання, великими витратами енергії, і, як наслідок, – підвищеною витратою різальних інструмен-

тів. Для підвищення експлуатаційних властивостей і розширення сфери застосування різальних інструментів їх робочі поверхні модифікують захисними покриттями з комплексом спеціальних фізико-механічних і хімічних характеристик.

Наявність на контактних поверхнях різальних інструментів захисних покриттів обумовлює зміну механічних і фізико-хімічних механізмів контактної взаємодії інструментів з оброблюваними виробами. Перше визначається зміною коефіцієнту тертя, сили і температури різання та, як наслідок, перерозподілом напружень на поверхнях інструментів. Друге пов'язане з тим, що для забезпечення найбільш оптимальних умов роботи різальних інструментів в кожному конкретному випадку потрібно вибирати таке покриття, що забезпечує мінімізацію або відсутність ефектів, які негативно впливають на працездатність інструментів. Захисне покриття також повинне відігравати роль пасивного протектора, що перешкоджає безпосередньому контакту, або відігравати певну роль, змінюючи умови хімічної взаємодії інструментального й оброблюваного матеріалів у зоні різання.

У зв'язку з цим склад (елементи, які формують окремі фази, вид і відносний зміст фаз, хімічний взаємозв'язок між фазами), структура і властивості захисних покриттів оказують безпосередній вплив на умови контактної взаємодії в зоні різання і, тим самим, забезпечують підвищення ефективності обробки виробів з важкооброблюваних матеріалів.

Для підвищення працездатності різальних інструментів необхідно використати тверді покриття зі збільшеним опором пластичної деформації і зниженим рівнем внутрішніх напружень, збільшити внутрішні напруження в поверхневому шарі основного матеріалу інструменту в процесі формування покриття та забезпечити високу адгезія між покриттям і основним матеріалом інструменту.

Механічні властивості покриттів добре характеризуються їх твердістю H , ефективним модулем Юнга $E^* = E/(1-\nu^2)$ (E – модуль Юнга і ν – коефіцієнт Пуассона), величиною пружного відновлення We . Ці величини можуть бути обчислені з кривих навантаження / розвантаження, виміряних за допомогою мікротвердоміру. Значення H і E^* дозволяють обчислити співвідношення H^3/E^{*2} , яке пропорційно опору матеріалу пластичної деформації. Імовірність пластичної деформації знижується в матеріалах з високою твердістю і низьким модулем Юнга E^* . Взагалі, низький модуль

Юнга E бажаний, оскільки він дозволяє розподілити діюче навантаження по більшій контактній зоні.

Вирази $H = f(E)$, $H^3/E^{*2} = f(H)$, $We = f(H)$ визначають механічну поведінку тонких покриттів при навантаженні [1, 2].

Інша важлива механічна особливість матеріалу – його здатність до пластичної деформації. Рівень пластичної деформації W_p покриттів зменшується зі збільшенням H і H^3/E^{*2} [3]. Тверді покриття з $H > 25$ ГПа мають відносно низьку здатність до пластичної деформації $\sim 30\%$.

За величиною співвідношення H^3/E^{*2} можна судити про опорність матеріалу покриття пластичної деформації, а також адгезійну / когезійну міцність покриття.

Аналіз контактного навантаження в шаруватій системі «покриття-основа інструменту» показує, що перевищення зсувними напруженнями на кордоні розділу шарів критичної величини призводить до утворення прикордонних тріщин або відшарування покриття. Величина зсувних напружень значною мірою визначається різницею між внутрішніми напруженнями в основі інструменту та покритті, а також коефіцієнтом тертя на поверхні покриття. Зниження останнього не тільки збільшують опір зношуванню, але і знижує зсувні напруження, сили і температуру на кордоні розділу шарів, тобто мінімізує можливість руйнування в контактній зоні «покриття-основа інструменту».

З врахуванням відміченого створено гама покриттів для різальних інструментів: відносно простих типу TiN, багатокомпонентних – (TiZrNbCrSi)N, (TiVZrNbHfTa)N, багат шарових систем NbN/Al₂O₃, TiN/Co, (TiZrNbTaHf)N/MoN та ін. За рахунок оптимізації складу і архітектури покриттю забезпечується комплекс фізико-механічних, хімічних і теплофізичних властивостей, що відповідає умовам навантаження інструментів з покриттям в експлуатації.

Література

1. Leyland, A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behavior / A. Leyland, A. Matthews // Wear. –2000. – Vol. 246. – P. 1–11.

2. Горбань, В.Ф. Идентификация структурного состояния материалов методом автоматического индентирования / В.Ф. Горбань, Н.А. Мамека, Э.П. Печковский, С.А. Фирстов // Сб. докл. Харьков-

ской нанотехнологической ассамблеи. – Т. 1. Наноструктурные материалы. – Харьков : ННЦ ХФТИ, ИПП Контраст, 2007. – С. 52–55.

3. Musil, J. Hard and superhard nanocomposite coatings / J. Musil // Surf. and Coat. Technol. – 2002. – Vol. 160. – P. 206–218.

Бурькин В.В., Муковоз С.Ю. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОЛИМЕРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Финишная обработка базовых деталей полимерного машиностроения позволяет добиться качества выпускаемых изделий тяжелого оборудования для шинных, резинотехнических, кабельных заводов, химической, электротехнической и других отраслей промышленности. Разнообразие областей применения и функционального назначения, уникальность, малая повторяемость, большие габариты и масса выпускаемых машин оказывают существенное влияние на организацию производства и технологию заключительной стадии обработки деталей, обеспечивая возможность избежать брака всего изделия.

Основными рабочими органами многих машин являются крупногабаритные длинномерные детали типа валков, барабанов, червяков, гильз, камер и т.д., которые выполняются по 5-6 качеству точности, с высокими классами шероховатости рабочих поверхностей и определенными требованиями к качеству упрочненного поверхностного слоя.

При разработке технологических процессов изготовления таких деталей возникают проблемы в связи с необходимостью экономно и рационально использовать материал, повышать производительность труда и качество выпускаемой продукции. Названные проблемы реализуются по таким основным направлениям, как разработка рациональной технологии изготовления машин, которая включает применение прогрессивных методов формообразования поверхности деталей из материалов с повышенными физико-механическими характеристиками и методов финишной обработки.

Различают несколько способов финишной обработки, которые зависят от ряда физико-химических свойств основного металла и покрытия, конфигурации детали, назначения и условий ее эксплуатации. Иногда деталь проходит сразу несколько стадий финишной обработки – нанесение покрытия и целый комплекс комбинированных металлообрабатывающих операций.

Нанесение жаропрочных, износо- и коррозионностойких покрытий на рабочие поверхности их деталей с использованием электродуговой металлизации, плазменных, детонационных и других технологий обеспечивает снижение коэффициента использования металла и совершенствование технологических процессов их механической финишной обработки.

Широко распространенная механическая обработка деталей точением, фрезерованием, шлифованием и др. характеризуется контактом металлорежущего инструмента с обрабатываемой поверхностью. Форма инструмента и форма обрабатываемой поверхности часто не позволяют достичь требуемого качества, а иногда и просто производить обработку лезвийным инструментом.

В зависимости от твердости наплавленного металла ($> \text{HRC } 40\text{--}50$) и величины припуска обработку поверхности деталей выполняют шлифованием. Сначала при пониженных режимах резания проводят черновую обработку, а затем чистовую. Учитывая пониженную теплопроводность и возможность перегрева покрытия, вызывающего изменение его свойств, обработка деталей шлифованием затруднена, и может привести к снижению микротвердости покрытия и возникновению шлифовочных трещин не только в покрытии, но и в основном металле, что приводит к скалыванию наплавленного слоя. Шлифовочные трещины особенно опасны, так как они являются концентраторами напряжений и снижают усталостную прочность упрочненных деталей. Поэтому, для таких материалов применяют технологию чистового точения лезвийными инструментами из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ).

В настоящее время накоплен богатый производственный опыт использования лезвийных инструментов из ПСТМ для финишной обработки деталей с покрытиями. Наиболее широкое применение в промышленности нашли композиты на основе кубического нитрида бора. Чистовая токарная обработка позволяет в ряде случаев отказаться от операции шлифования – традиционного способа обработки деталей из материалов высокой твердости, к поверхностям кото-

рых предъявляются требования по шероховатости $Ra < 0,32$. Однако детали после них нуждаются в дополнительной доработке другими финишными методами.

Поэтому целью настоящей работы является определение тенденций развития технологий финишной обработки и путей совершенствования чистового точения деталей полимерного оборудования с учетом требований современного производства.

Современные технологии финишной обработки базируются на результатах широкого круга научных исследований природы и закономерности протекания механических и физико-химических процессов в зоне контакта инструмента с изделием и комплекса отделочных операций. Одним из наиболее простых и эффективных методов обработки является чистовое точение инструментом, оснащенным ПСТМ, которое позволяет изготавливать детали типа «тел вращения» из различных материалов с достижениями требуемых формы и точности размеров при высоком качестве обработанных поверхностей.

Особое место в обеспечении эффективности процессов механической обработки занимает правильный выбор материала и геометрических параметров режущего инструмента, что позволяет достичь при точении деталей с покрытиями шероховатость поверхности $Ra 0,16-0,32$. Эти инструменты имеют свои характеристики, преимущества и недостатки и широко применяются для обработки деталей с простыми поверхностями.

При финишном точении повышения производительности можно добиться за счет изменения геометрических параметров режущих инструментов, обеспечивающих возможность обработки с увеличением подачи. Вершина инструмента выполняется в форме кривой, образованной при сопряжении главной и вспомогательной режущих кромок набором окружностей с подобранными радиусами. Специальная режущая кромка обеспечивает при работе инструмента минимальный вспомогательный угол в плане, что позволяет увеличивать рабочую подачу без потери качества обработанной поверхности. При увеличении подачи, кроме роста производительности обработки, вдвое снижается время контакта инструмента с обрабатываемым изделием и увеличивается период его стойкости.

Различные традиционные технологические методы точения поверхности длинномерных деталей обеспечивают повышение ее качества в 2 раза при износостойкости режущего инструмента лишь в

1,5 раза. Поэтому в последнее время все большее влияние уделяется комбинированным технологиям обработки с наложением ультразвуковых колебаний.

В данной работе предпринята попытка испытания устройства для ультразвуковой обработки (УЗО) и исследования влияния технологического процесса точения на шероховатость обработанной поверхности длинномерных валков полимерного оборудования, которым предъявляются повышенные требования. Валки формируют шероховатость поверхности заготовки пленки, а также обеспечивают равномерность толщины заготовки по длине, которая зависит от точности поддержания частоты вращения барабана и прямолинейности образующей. Шероховатость поверхности валка должна соответствовать 0,16 мкм.

Обработке подвергались валки $\varnothing 175$ мм и $L = 1800$ мм из стали 40Х и напыленные сплавом ХВС-3 резцами из ПСТМ без технологической охлаждающей среды. Наладка и испытания устройства для УЗО проводились на токарном станке мод. SPA-10 (Румыния). В резцедержателе станка было установлено приспособление с акустической системой из электротехнической стали 49К2Ф1 толщиной 0,5 мм. Ее питание осуществлялось от ультразвукового генератора мод. УЗГ 5-1,6/22 с охлаждением водяной помпой мод. Х14-22М [1].

В результате проведенных испытаний установлено, что на режимах обработки $v_p = 1,0-1,5$ м/с; $S = 0,05-0,20$ мм/об; $t_p = 0,05-0,15$ мм; $r = 6,5$ мкм; $2A = 3-4$ мкм; $f_p = 22 \pm 1,65$ кГц стойкость резца при точении валков с покрытием из сплава ХВС-3 за счет снижения сил резания, достигает $T = 120$ мин при обеспечении однородного микрорельефа поверхности $Ra < 0,16$. Для токарных проходных и подрезных резцов в качестве признака затупления в условиях чистовой (окончательной) обработки покрытий рекомендуется величина износа по задней поверхности $h_3 = 0,4-0,6$ мм.

Ультразвуковые технологии точения находят широкое применение в современной химической отрасли промышленности, обеспечивают высокую производительность при производстве деталей из труднообрабатываемых высокотехнологичных материалов, трудно поддающихся обработке резанием. Совмещая обработку с инструментом определенной геометрией режущей кромки, достигается увеличение скорости и величины подачи, продление срока службы инструмента и обеспечиваются показатели шероховатости поверхности $Ra < 0,16$ мкм по сравнению с традиционной обработкой.

Литература

1. Бурыкина, М.В. Формирование параметров качества поверхностного слоя длиномерных деталей точением с использованием ультразвука / М.В. Бурыкина, В.В. Бурыкин // Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання властивості, застосування: Тез. доп. конф., 18–19.04.2006, м. Київ. – К. : ІНМ НАН України, 2006.– С. 16–17.

*Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Аббасов К.Т.,
Хеук М.В.* Брестский государственный технический
университет, Брест, Беларусь

К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ТЕЛ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА

Современный уровень техники выдвигает перед инженерами, исследователями требования по созданию эффективных методов расчета, позволяющих снизить материалоемкость элементов при их достаточной прочности и надежности. Основная цель таких методов – исследовать напряженно-деформированное состояние рассматриваемых тел и распределение полей температур. Для этого необходимо сформулировать и решить краевые задачи теплопроводности, термоупругости. Во многих случаях достаточно ограничиться рассмотрением двумерной области. Решение задачи теплопроводности для тел с изменяющимися тепловыми характеристиками представляет собой актуальную задачу при воздействии высоких полей температур. Аналитическое решение уравнения теплопроводности для тел конечных размеров практически невозможно, поэтому целесообразно для решения такого рода задач применять численные методы [1].

Рассмотрим уравнение теплопроводности в виде (1), которое справедливо для стационарного температурного поля T в случае переменного коэффициента теплопроводности $\lambda = \lambda(T)$:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0, \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Введем новую функцию T^* следующим соотношением:

$$T^* = \int_0^T \lambda(T) dT \quad (2)$$

Из этого соотношения будем иметь:

$$\frac{\partial T^*}{\partial x_i} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Подстановка (3) в (1) дает:

$$\Delta T^* = 0, \quad (4)$$

т.е. функция T^* удовлетворяет уравнению Лапласа (4). Таким образом, если функция $T^*(x_1, x_2)$ найдена, соотношение (2) позволяет определить температуру $T(x_1, x_2)$.

Согласно [2], коэффициент теплопроводности разных веществ изменяется в широких пределах и зависит от химического состава, физического строения и состояния вещества. Для многих материалов коэффициент теплопроводности изменяется по линейному закону:

$$\lambda = \lambda_0(1 - kT), \quad (5)$$

где k – определяется с помощью экспериментальных кривых [3], λ_0 – коэффициент теплопроводности при исходной температуре.

Подставим (5) в (2) и после интегрирования получим:

$$T^* = \lambda_0 \left(T - \frac{1}{2} k T^2 \right), \quad (6)$$

отсюда:

$$T = \frac{1}{k\lambda_0} \left(1 - \sqrt{1 - 2kT^*} \right) \quad (7)$$

Таким образом, рассматриваемую задачу можно сформулировать следующим образом. В двухмерной области температура подчиняется уравнению Лапласа (5). На границе L области D задано значение температуры $T^* = F$. Область D ограничена контуром L . В такой постановке имеем задачу Дирихле. Решение этой задачи ищем в виде потенциала двойного слоя:

$$T^* = \int_L \chi(y) \frac{\cos \varphi}{r} dl_y, \quad (8)$$

где $\chi(y)$ – плотность потенциала, φ – угол между радиусом r и нормалью к контуру L в точке интегрирования y , x – фиксированная точка при интегрировании.

Обозначим через x_L случай, когда точка x попадает на границу L области D . В окрестностях точки x_L потенциал (8) имеет два предельных значения и одно прямое значение. Все эти значения определяются по формулам скачка:

$$T^*(x_L) = \pi\chi(x_L)\eta + V.p.\int_L \chi(y) \frac{\cos\varphi}{r} dl_y, \quad (9)$$

где $\eta = 1$ – для внутреннего предела, $\eta = 0$ – для прямого значения и $\eta = -1$ для внешнего предела.

В случае внутренней задачи Дирихле внутренний предел из (9) приравняем к заданному значению F и получаем интегральное уравнение:

$$\pi\chi(x_L) + V.p.\int_L \chi(y) \frac{\cos\varphi}{r} dl_y = F(x_L) \quad (10)$$

Определив из (10) неизвестную плотность потенциала $\chi(y)$, по формуле (8) получим значение T^* в любой точке рассматриваемой области D . Зная T^* , по формуле (7) определяется истинное значение температуры T в любой точке.

Литература

1. Хвисевич, В.М. Теория потенциала и ее применение в прочностных расчетах однородных изотропных тел при температурных воздействиях / В.М. Хвисевич, А.И. Веремейчик, В.В. Гарбачевский // Перспективные материалы и технологии. В 2 т. – Витебск : УО «Витебск. гос. технолог. унт», 2017. – Т.2. – С. 491–507.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа. – 1967. – 599 с.
3. Шнейдер, П. Инженерные проблемы теплопроводности / П. Шнейдер. – М., 1960. – 340 с.

Гонтар О.Г., Конейкіна М.Ю. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України
Дабіжа Є.В. МДНВВП «ЕКМА» НАН України, Київ
Береснев В.М. Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна
Васильєв В.В., Стрельницький В.Є. ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків
Погрелюк І.М. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів
Дейнека О.В. ТОВ «НВФ «Грейс-Інжинірінг», Суми, Україна

СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВАКУУМНИХ ПЛАЗМОВИХ І ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ШИРОКОГО СПЕКТРУ ЗАСТОСУВАННЯ

Мета роботи – створення та впровадження обладнання для нанесення високоефективних функціональних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, розробка технологій формування покриттів, що за своїми властивостями відповідають умовам експлуатаційного навантаження виробів з покриттями широкого спектру застосування та відповідають найкращим світовим аналогам, дозволяючи багаторазово подовжити термін експлуатації деталей та забезпечити можливість інтенсифікації багатьох виробничих процесів. Даний процес дозволяє виділити вакуумні плазмові покриття на основі алмазоподібних композицій, нітридів перехідних металів, вакуумні покриття з нітридів, карбонітридів металів, що отримані дифузійним методом, як найбільш поширені в промисловості та перспективні у майбутньому.

При створенні покриттів враховано, що метод формування, склад і архітектура повинні надавати покриттям комплекс фізико-механічних, хімічних і теплофізичних властивостей, які відповідають умовам експлуатаційного навантаження виробів з покриттями і визначають перспективну галузь застосування.

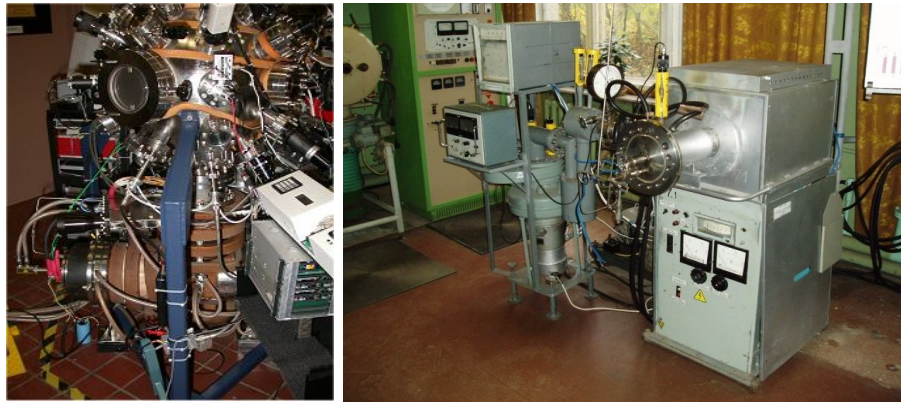
Розроблено основні положення методології проектування вакуумного обладнання для отримання плазмових та дифузійних покриттів, використання яких дає можливість розв'язати комплекс мультидисциплінарних задач, пов'язаних з процесом багатопараметричної, багатокритеріальної, багаторежимної оптимізації складових процесів, до яких належить формування покриттів. Прикладами вирішення цих задач є створення та використання: – джерел фільтрованої вакуумно-дугової плазми, які при високій якості очищення плазми від макроча-

стинок забезпечують малі транспортні втрати плазми і рівномірність товщини покриттів на великій поверхні; – системи створення тліючого розряду, який збуджується шляхом застосування ВЧ-напруги; – пілотної установки для плазмохімічного осадження алмазоподібних вуглецевих плівок а-С:Н; – імпульсного джерела живлення, в якому реалізований принцип живлення магнетронної системи біполярним імпульсним струмом складної форми; – біполярного джерела живлення, яке забезпечує передачу на мішень, що розпилюється, імпульсу позитивної напруги і забезпечує роботу магнетрону без дуг навіть на забрудненій мішені; – імпульсного джерела на основі ВЧ-генератору з метою стимуляції осадження і підвищення якості покриттів; – систем вакуумного, газового і температурного контролю, охолодження камери дифузійного насичення.

Створено унікальне технологічне обладнання і технології, які забезпечили розв'язання комплексу складних задач, пов'язаних з процесами оптимального проектування та конструювання, технологічного забезпечення отримання широкої гами сучасних вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, які володіють потрібним комплексом властивостей відповідно до умов експлуатаційного навантаження виробів з покриттям.

Для формування покриттів були розроблено та виготовлено нове обладнання, створені промислові установки «Булат-7», ННВ 6.6. И1, установка для нанесення дифузійних покриттів. З використанням нових фільтрів та джерел плазми, джерел енергії, розпилення, іонів, додаткового обладнання вакуумних камер були модернізовані установки «Булат-3Т», «Булат-6» (Україна), ВУ-700 «Д», ВУ-2МБС і ВУ-1100 «Д» (Білорусь).

Детально розглянуто питання синтезу алмазоподібних плівок (безводневі аморфні вуглецеві а-С; аморфний нітрид вуглецю CN_x з фулереноподібною структурою; гідрогенізовані вуглецеві а-С:Н) при розкладанні газоподібних вуглеводнів в різного типу розрядах, технологічні особливості отримання градієнтних дифузійних покриттів систем TiN, TiCN, багатокомпонентних покриттів від BN, TiN до (TiZrNbCrSi)N, (TiVZrNbHfTa)N, багат шарових – від Al_2O_3/NbN , TiN/Co до (TiZrNbTaHf)N/MoN та показано, що за рахунок використання створених технічних рішень, оптимізації складу й архітектури покриття забезпечується комплекс фізико-механічних, хімічних і теплофізичних властивостей, необхідний для довготривалої експлуатації виробів. На рис. 1 наведено приклади створеного обладнання для нанесення покриттів та деяких виробів з покриттям.

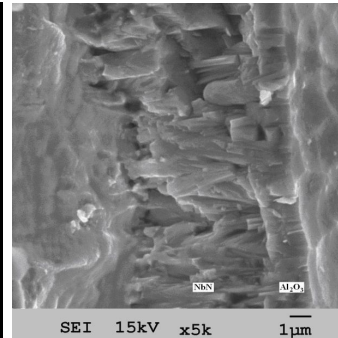


a

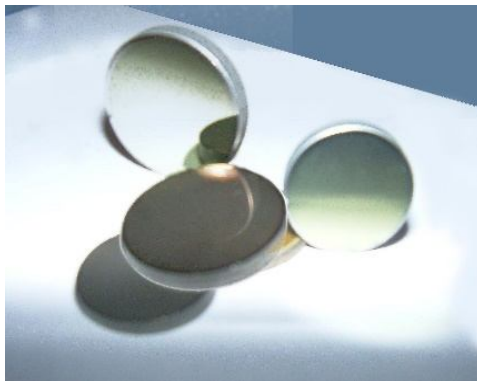
б



в



г



д



е



ж



з

Рис. 1 – Широкоапертурне джерело фільтрованої вакуумно-дугової плазми (*a*), установка для нанесення дифузійних покриттів в вакуумі (*б*), компресорні лопатки ГТД різного типорозміру (*в*), злам різального інструменту, оснащеного композитом «Борсиніт» з покриттям $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NbN-Ti}$ (*г*), монтаж куполу з покриттям храму в Республіці Македонія (*е*), дентальні імпланти (сплав ВТ6) з дифузійним покриттям (*ж*), торцеві кільця ($\varnothing 225$ мм) з SiC з алмазоподібним покриттям (*з*)

Результати виконаних дослідно-конструкторських та науково-дослідних робіт зі створення обладнання для нанесення вакуумних плазмових та дифузійних покриттів, технологій нанесення покриттів, оптимізації складів покриттів, вивчення їх фізико-механічних властивостей та експлуатаційних можливостей є базою для широкого практичного використання функціональних покриттів у різних галузях промисловості – машино- та авіабудуванні, металообробці, медицині, оптико-електроніці, будівництві та інш.

Виконана робота зі створення функціональних плазмових та дифузійних покриттів показала, що за техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками вони відповідають кращим світовим зразкам і є найкращими в Україні, а їх використання в різних промислових умовах дозволяє суттєво підвищити працездатність різноманітної техніки, її ефективність, надійність, конкурентоспроможність.

Створені обладнання, технології та покриття не чинять шкідливого впливу на оточуюче середовище.

Ефективність застосування результатів роботи обумовлена підвищенням працездатності обладнання для формування покриттів, збільшенням строків експлуатації виробів з покриттями, організацією промислового виробництва та реалізацією деталей з покриттями для промисловості України та інших країн.

Робота «Створення функціональних вакуумних плазмових і дифузійних покриттів широкого спектру застосування» представлена для отримання Державної премії України в галузі науки і техніки 2020 року

*Домулажанов И.Х., Домуладжанова Ш.И., Латипова М.И.,
Турдалиева М.М. Ферганский политехнический
институт, Фергана, Узбекистан*

АНАЛИЗ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО ЦЕХА

Цех концентрированной уксусной кислоты из водных растворов уксусной кислоты (25–03%), поступающих из цеха ацетатов целлюлозы и уксусного ангидрида предназначен для получения уксусной кислоты, путем экстракции уксусной кислоты этил ацетатом с последующей ректификацией эфирокислоты [1–14].

Производство регенерации уксусной кислоты в соответствии со СНИП П-М-2-72 по условиям работы и характеристики применяемых веществ является взрывопожароопасным и относится к категории «А». Класс помещения цеха регенерации уксусной кислоты в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» определен как В-1Г, для наружных установок, в которых образование взрывоопасных смесей возможно только в результате аварий или неисправностей.

Агрессивные жидкости и парообразные вещества могут создавать загазованность и служить причиной химических и термических ожогов и отравлений.

Опасность химических ожогов и отравлений обусловлена работой с растворами щелочи, серной и уксусной кислоты. При травлении возможны попадания химических веществ, при вдыхании паров в организм человека.

Насыщенность производства электрооборудованием, механизмами с вращающимися частями создают опасность получения механических травм и поражения электрическим током.

Опасными продуктами в цехе являются:

- уксусная кислота – бесцветная, прозрачная, легко воспламеняющаяся жидкость с резким острым запахом.
- пары уксусной кислоты вызывают раздражения слизистых оболочек верхних дыхательных путей и глаз. Длительное воздействие пара вызывает заболевание носоглотки и конъюнктивит.

Уксусная кислота концентрации 30% и более, попадая на кожу, вызывает ожоги и боль. Для глаз опасны растворы 2% концентрации и выше. При попадании уксусной кислоты на кожу или глаз пораженное место необходимо смыть обильным количеством воды в течении 10–15 мин, после этого пострадавшего направить в здравпункт. Для защиты органов дыхания от паров уксусной кислоты применять противогазы марок «Б» или «БКФ».

Этилацетат–легковоспламеняющаяся, бесцветная жидкость наркотического и умеренно – раздражающего действия. Может вызвать дерматиты или кожные заболевания.

Предельно допустимая концентрация этого вещества на рабочем месте ПДК – 200мг/м³. Первая помощь при отравлениях: вынести пострадавшего на свежий воздух, дать понюхать нашатырный спирт. Для защиты органов дыхания от паров этилацетата применять противогазы марок «А» или «БКФ».

Этиловый спирт – бесцветная легко воспламеняющаяся жидкость. На организм человека оказывает наркотическое воздействие. При длительном воздействии больших доз может вызвать тяжелое заболевание нервной системы, пищеварительного аппарата, сердечнососудистой системы, печени. При частом соприкосновении вызывает сухость кожи. Для защиты от паров этилового спирта применяются противогаз марки «А» или «БКФ».

Серная кислота – бесцветная масляная жидкость с резким запахом. Предельно допустимая концентрация на рабочем месте – 1 мг/м^3 . Сильный окислитель, воспламеняет органические вещества.

Пары серной кислоты вызывают тяжелое заболевание бронхов и легких. При ожоге серной кислотой необходимо обильное промывание пораженного места водой или слабым содовым раствором. При отравлении парами серной кислоты делать ингаляции содовым раствором, пить теплое молоко с содой.

Для защиты от паров серной кислоты применяется противогаз марки «В» или «БКФ», суконная спецодежда, резиновые рукавицы и сапоги, прорезиновый фартук, защитные очки.

Едкий натр – 43% раствор едкого натрия – вязкая жидкость синеватого цвета, без запаха. Предельно допустимая концентрация для аэрозоля – $0,5 \text{ мг/м}^3$. Действует на кожу прижигающее действие при постоянной работе с растворами едкого натра наблюдаются дерматиты, экземы. Особенно опасны попадания даже самых малых количеств едкого натра в глаза.

Действие раствора тем сильнее, чем раствор концентрированнее, и чем выше по температуре. При попадании щелочи на кожу рекомендуется обильное промывание пораженного участка водой, примочки на 5% раствора уксусной кислоты или лимонной кислоты, сухая повязка. Меры защиты: очки, резиновые перчатки и сапоги, хлопчатое – бумажная специальная одежда.

Азот – бесцветный газ, без запаха, не горюч. Содержание азота в магистрали – 99,5% объемных, содержание кислорода до 0,5% объемных. При обычных условиях химически инертен.

Действует на организм человека удушающе. При содержании кислорода в окружающей среде менее 18% об., за счет азота наступает кислородное голодание. Средством индивидуальной защиты служит противогаз типа ПШ-1 или ПШ-2 (противогаз шланговый), а также кислородно-изолирующий противогаз марки КИП-7.

Сточные воды в химически загрязненной канализации (содержание этилацетата не более 0,2% и уксусной кислоты не более 0,1%) обладают свойствами разбавленных кислот. Поэтому опасно попадание сточных вод в глаза. Меры защиты фильтрующий противогаз «БКФ», суконный костюм, резиновые сапоги, перчатки, для защиты глаз – очки.

Согласно требованиям санитарии в воздухе рабочей зоны производственного помещения имеются предельно допустимых концентрации (ПДК, мг/м³) вредных веществ [1].

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны являются максимально разовыми. Рабочей зоной следует считать пространство высотой до 2 м над уровнем пола или площадке, на которой находятся места постоянного или временного пребывания работающих.

Оптимальный микроклимат в помещении обеспечивает с помощью вентиляции. Используются приточно-вытяжная система вентиляции, а также местные отсосы. На рис. 1 приведена схема вентиляции.

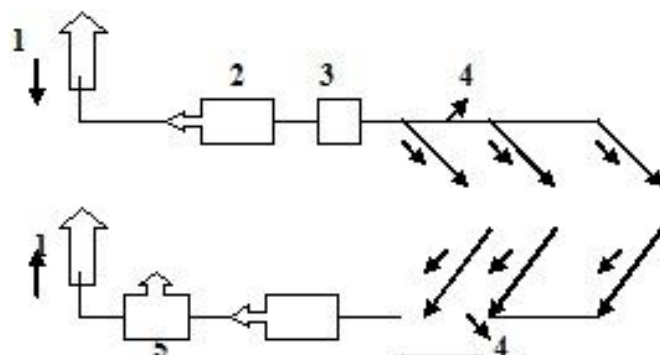


Рис. 1 – Схема приточно-вытяжной системы вентиляции.

- 1 – диффлектор; 2 – вентилятор; 3 – кондиционер или калорифер;
- 4 – воздуховоды; 5 – циклон или фильтр

Для освещения помещения цеха применяют естественное и искусственное освещение. Естественное – боковое через оконные проемы и верхнее через световые фонари, с также искусственное освещение верхнее равномерное, которое применяется при работе в темнее время суток и вечером. Нормы искусственного освещения на рабочем месте составляют $E_n = 300$ лк. Для обеспечения такого освещения на рабочем месте используются светильники с газоразрядными лампами. Аварийное освещение включается при чрезвычайных ситуациях.

Опасность поражения электрическим током в цехе может произойти при неисправном оборудовании и нарушении ТБ персоналом. Для защиты работающего персонал от поражения электрическим током в проектируемом цеху используется защитное заземление и защитное зануление (рис. 2).

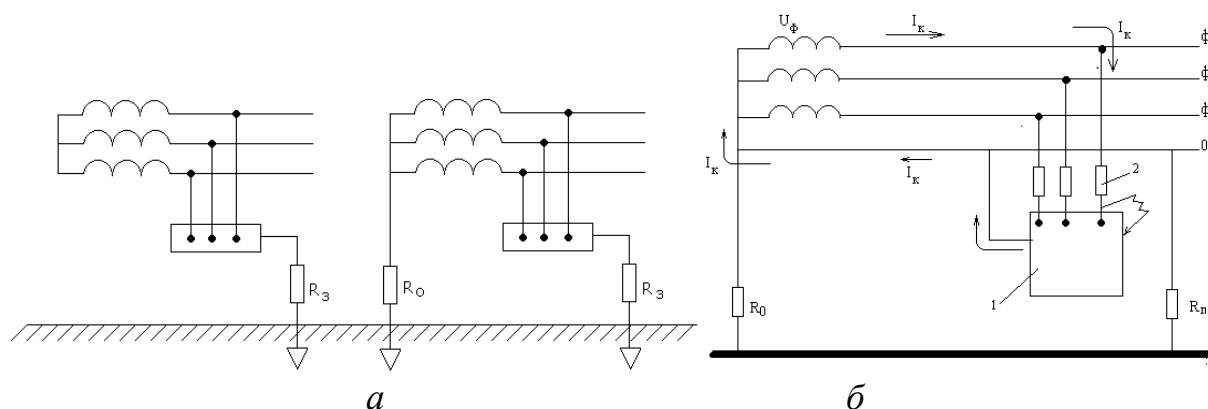


Рис. 2 – Схема защитного заземления и зануления

Согласно СНиПа данное производство относится к категории «А» взрывопожароопасное. Для пожарного обеспечения данного производства в цехе регенерации уксусной кислоты, предусмотрена установка специального пожаротушения. В качестве огнегасящего вещества принята распылительная вода. Способ пожаротушения – локальный. Пуск установки дистанционный из-за отсутствия датчиков автоматического пуска.

Пожарные краны устанавливаются на лестничных клетках соединительная головка для подключения пожарного рукава пожарной машины. Расход воды на пожаротушение составляет 10 л/сек. из расчета работы двух пожарных струй производительностью 5 л/сек. каждая. На лестничной клетке на соответствующей отметке имеются огнетушители ОП-2, ОУ-5 и т.п. (рис. 3), которые содержатся в исправном состоянии.

Наряду с этим на объекте используется автоматическая система пожаротушения – со спринклерными головками и тепловыми извещателями (см. рис. 3).

Для улучшения условий труда предусматриваются следующие мероприятия:

- контроль за содержанием, сохранность и постоянной готовности к действию первичных и стационарных средств тушения пожара в цехе осуществляют представители пожарной охраны;

- запрещается использовать средства пожаротушения не по назначению;
- огнетушители, ящики для песка, ведра, щиты для инвентаря, ручки для лопат, футляры для асбестовых одеял должны быть покрашены в красный цвет;
- пригодность заряда пенных огнетушителей проверяют раз в год;
- пенные огнетушители должны быть с биркой, на которой указывается дата его зарядки и кем заряжен;
- песок в ящиках следует регулярно осматривать, при увлажнении, комковании просушивать и просеивать;
- рукава внутренних пожарных кранов должны быть всегда сухими и хорошо скатанными. Один конец рукава должен быть присоединен к стеклу, а другой к крану.



**Рис. 3 – Огнетушители ОУ-2–ОУ-10 (а), тепловой извещатель (б),
спринклерная головка (в)**

Этими мероприятиями обеспечиваются безопасные условия труда персонала.

Литература

1. Хабиров, Р.С. Справочник эколога-эксперта / Р.С. Хабиров, Н.В. Королева, Т.Р. Ишмухамедов. – Ташкент : Госкомприрода, Госэкоэкспертиза, ООО «Кони-Нур», 2009. – 528 с.

Иванов А.А., Присяжнюк П.Н., Луцак Д.Л.
Ивано-Франковский национальный технический
университет нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

ПОВЫШЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАПЛАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ НА ОСНОВЕ БОРИДОВ/КАРБИДОВ МЕТАЛЛОВ

Сегодня актуальной и важной является задача повышения износостойкости оборудования, работающего в условиях интенсивного абразивного износа [1], а также при высоких удельных и циклических нагрузках. К такому оборудованию относятся шнеки для прессования древесных отходов, оборудование для производства кирпичей, твердотопливных брикетов и т. д. Наплавление с использованием порошковых электродов (FCAW) является широко используемым методом повышения стойкости к абразивному износу за счет получения высокого содержания легирующих элементов в поверхностном слое [2]. Наиболее часто используемые наплавочные материалы на основе системы Fe-Cr-C из-за их высокой твердости, хорошей коррозионной стойкости и износостойкости [3], такие материалы включают в себя современные электроды серийного производства, изготовленные Lastek, ESAB, Paton IEW и т. д. Однако традиционные материалы серийного производства, основанные на системе Fe-Cr-C, характеризуются низким сопротивлением в условиях абразивного износа при высоких удельных и циклических нагрузках. Поэтому возникает проблема создания альтернативных экономически целесообразных систем для восстановления изнашиваемых деталей оборудования. Модифицированные наплавленные слои на основе Fe-Cr-C состоят, в основном, из крупных карбидов хрома типа M_7C_3 , евтектических карбидов и матрицы на основе Fe [4]. Карбиды хрома в поверхностном слое распределены не равномерно в Fe матрице, что ведет к формированию хрупкой структуры, особенно при наплавлении нескольких слоев [5].

Чтобы повысить износостойкость, некоторые исследователи полностью заменили хром в упрочняющих элементах на другие карбидообразующие элементы, такие как Ti, V, Mo [6].

Наличие равномерно распределенной твердой фазы в матрице на основе Fe может быть получено с использованием Ti-легированных порошковых материалов. Структуру с равномерно распределенными твердыми карбидными частицами в металлической матрице что представляет собой композит с металлической матрицей (ММС) возможно получить с помощью технологии синтеза «*in-situ*», посредством которой карбидные частицы формируются «*на месте*» в металлической матрице во время плавления и затвердевания. Данная структура может выдерживать высокие абразивные нагрузки [7].

Для легирования системы Fe-Ti-C исследователи чаще используют Mo, Nb и V [8]. Также желательно присутствие бора в системе, что обеспечит образование боридов и других элементов. Высокая твердость боридов титана (~ 32 ГПа) и их низкая растворимость в Fe (~ 1 мас.%) обеспечит гетерогенную структуру, в которой металлическая матрица и частицы карбидов будут работать в условиях динамических нагрузок.

В данном исследовании целью было создание наплавочного слоя с высокой объемной долей тугоплавких соединений титана (TiC и TiB₂), диспергированных в пластичной матрице на основе Fe, с использованием проволоки FCAW, содержащей смесь реакционных порошков титана и карбида бора. Также, чтобы исследовать влияние добавок Cr, Mo металла на систему Fe-Ti-B-C.

В качестве исходных компонентов использовались металлические порошки Ti, Cr и Mo, а также порошок B₄C. При коэффициенте заполнения стальной оболочки (08 кп) 25%, химический состав электродов представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав электродов

Электрод №	Хим. элемент, мас.%				
	B ₄ C	Ti	Mo	Cr	Fe
1	6,95	18,05	–	–	остальное
2	5,098	6,6	13,278	–	
3	6,737	8,75	–	9,51	
4	4,026	–	20,97	–	
5	6,54	–	–	18,458	

Испытание на износ с фиксированным абразивом проводилось без смазки при комнатной температуре с использованием машины для

измерения износа. Материал абразивного кольца 64CF46L7V (ГОСТ 52781-2007). Нагрузка в зоне контакта составляла 3,5 кН, скорость скольжения 2 м/с, расстояние скольжения 800 м. Образцы для испытаний были обработаны в виде цилиндров с радиусом 10 мм.

Как видно из рис. 1, твердосплавные покрытия, полученные с помощью современных электродов серийного производства, имеют более высокий уровень износа, в то время как износостойкие покрытия, основанные на исследуемых системах Me-BC, находятся на более низком уровне износа в условиях абразивного износа с высокими удельными нагрузками.

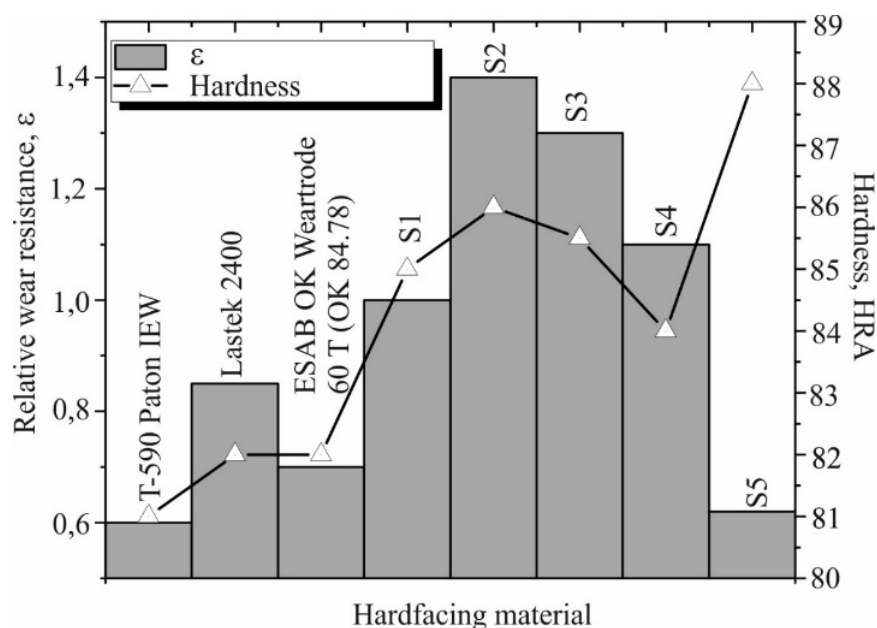


Рис. 1 – Зависимость относительной износостойкости ε (испытание на износ фиксированным абразивом) и твердость наплавленного материала

Наплавка на основе Fe-Cr-B-C показывает самую высокую твердость (~ 88 HRA) с самой низкой износостойкостью. Эта разница между твердостью и износостойкостью является результатом влияния крупной структуры на износостойкость в таких условиях. Таким образом, в условиях абразивного износа при высоких удельных нагрузках основной характеристикой, определяющей износостойкость, является особенности формирования структуры, а не твердость. Низкая износостойкость наблюдается для наплавочных покрытий на основе систем Fe-Ti-B-C и Fe-Mo-B-C. Такой слой, благодаря реакции синтеза «*in-situ*» во время FCAW, содержит гексагональные и равномерно распределенные частицы в эвтектической матрице. Низкая износостойкость наблюдается для наплавки на основе Fe-Ti-Mo-B-C благодаря тонкой структуре, которая содержит

тугоплавкие бориды и карбиды и их твердые растворы, которые образуются в результате реакции синтеза "*in-situ*" во время FCAW. Такие наплавки характеризуются высокой твердостью (~ 86 HRA) и повышенной износостойкостью в условиях абразивного износа при высоких удельных и циклических нагрузках.

Литература

1. Ivanov, O.O. Increasing the durability of working elements of equipment for abrasive-containing masses processing / O.O. Ivanov, P. M. Prysyzhnyuk, D.L. Lutsak et al. – Probl. of Tribol. – 2019. – Vol. 24, № 3/93. – P. 14–21.
2. Coronado, J.J. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits // Tribol. Internat. – 2009. – Vol. 42. – P. 745–749.
3. Sadeghi, F. The effect of Ta substitution for Nb on the microstructure and wear resistance of an Fe-Cr-C hardfacing alloy / F. Sadeghi, N. Hamidreza, A. Alireza // Surf. and Coat. Technol. – 2017. – Vol. 324. – P. 85–91.
4. Wang, Q. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys / Q. Wang, Li Xiaoyan // Welding J. – 2010. – Vol. 89, № 6. – P. 133–139.
5. Buchanan, V.E. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry / V.E. Buchanan, P.H. Shipway, D.G. McCartney. – Wear. – 2007. – Vol. 263. – P. 99–110.
6. Wang, Xin-hong. Microstructure of the Fe-based hardfacing layers reinforced by TiC-VC-Mo₂C particles / Xin-hong Wang, Fang Han and Shi-yao Qu // Surf. and Coat. Technol. – 2008. – Vol. 202. – № 8. – P. 1502–1509.
7. Correa, E.O. Development of an Iron-Based Hardfacing Material Reinforced with Fe-(TiW)C Composite Powder / E.O. Correa, N.G. Alcantara, D.G. Tecco, R.V. Kumar // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2007. – Vol. 38A. – P. 937–945.
8. Qi, X. Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal / X. Qi, Z. Jia, Q. Yang, Y. Yang // Surf. and Coat. Technol. – 2011. – Vol. 205. – P. 5510–5514.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE MECHANICAL VIBRATIONS OF THE STRIP ELECTRODE ON THE TRANSFER PROCESS OF THE ELECTRODE METAL DURING ELECTRIC ARC SURFACING

The strip electrode during the surfacing process melts unevenly in width; the droplets of molten metal formed in this process can have random sizes and can be randomly located at the end of the strip. Therefore, the electrode metal in some cases is unevenly distributed in the weld pool, which leads to the formation of chemical inhomogeneity in the weld, non-fusion and other macro- and microstructure defects, reducing the quality of the deposited layer.

It is known that the use of high-speed filming in the study of the process of melting the electrode strip in an open arc made it possible to establish the possibility of multiple transfers of drops of electrode metal from the end of the electrode. This is due to the higher melting performance of the strip electrode, which is associated with a change in the thermal efficiency of the droplet formation process. The influence of mechanical vibrations of the end of the strip electrode on the process of droplet transfer to the weld pool has not been previously studied.

Investigations were made of the droplet transfer process from the end of the strip electrode depending on the oscillation frequency with the aim of developing a methodology for the quantitative assessment of the characteristics of heat and mass transfer of the electrode metal and its energy effect on the formation of the weld pool. Drops of electrode metal were obtained by surfacing on a graphite cylinder rotating at a constant speed with a sliding current supply. The cylinder rotation speed was set so that the linear speed of its surface points was within the recommended range of surfacing speed – 10÷18 mph. A receiving tray was located under the cylinder, the bottom of which was covered with a layer of alumina to prevent droplets from being welded to the tray. For research, we used electrode carbon strips of 08C, 30CrMnSi types and an austenitic strip of 12Cr18Ni10Ti type. The strip electrodes were previously cut to obtain the same cross section – 30×0.5 mm to prevent the influence of

the sizes of the strips on the process of their melting. To determine the time of droplet formation (finding the arc on the local section of the end of the strip electrode), we used surfacing process oscillograms with a portable analog-to-digital converter (ADC).

Experimental data showed that the dependence of the droplet transfer parameters is extreme in nature from the parameters of the deposition mode, and the material of the strip electrode affects the size and mass of the droplets. It was also found that a change in the speed of movement of the arc relative to the cylinder for drop formation in the entire investigated range does not affect the melting parameters of the strip electrode. Analysis of the data from the studies made it possible to establish that the use of mechanical vibrations of the end of the strip electrode allows one to reduce the size and volume of drops of electrode metal by 9÷37 %, depending on the material of the strip. This provides a more stable and droplet transfer to the weld pool, especially when using high-alloy austenitic electrodes.

Data on the size and mass of the droplets were used to develop a calculation method for the droplet transfer parameters during electric arc surfacing. In the calculation, it was assumed that the molten drop at the end of the strip electrode has the shape of a spherical segment with a base equal to the thickness of the strip electrode. The calculation of the heat content of the drops of the electrode metal confirmed the conclusion about the favorable effect of mechanical vibrations of the end of the strip electrode on the efficiency of its melting. Thus, the decrease in the average design temperature of the overheating of the drops of electrode metal when using mechanical vibrations of the end of the strip with a frequency of 50 Hz ranged from 10 to 20%.

Thus, during electric arc welding with a strip electrode, changing the parameters of the mechanical vibrations of the end of the strip allows us to control not only the droplet transfer frequency, but also to reduce the size and temperature of the droplets of the electrode metal, providing a reduction in heat input into the base metal and the formation of a favorable structure of the weld bead.

*Калашников И.Е., Быков П.А., Кобелева Л.И.,
Колмаков А.Г.* Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН,
Михеев Р.С. МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия
Хейфец М.Л. Институт прикладной физики
НАН Беларуси, Минск, Беларусь
Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Институт сверхтвердых
материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ Sn-Sb-Cu, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СУБМИКРОННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Антифрикционные сплавы на оловянной основе называют баббитами и применяют преимущественно в подшипниках скольжения машин и механизмов ответственного назначения, к которым относятся: прокатные станы, паровые и газовые турбины, распределительные валы двигателей и компрессоров, а также другие тяжело нагруженные изделия [1]. Лучшими антифрикционными свойствами среди баббитов характеризуются сплавы системы Sn-Sb-Cu, к числу которых относится сплав марки Б83. Однако, олово (Sn), являющееся основным компонентом в составе баббитов марки Б83, является дорогим с экономической точки зрения исходным материалом, что обуславливает высокую стоимость сплавов подобного состава. Поэтому для уменьшения расхода дефицитного олова во многих случаях баббиты применяют в виде рабочих слоев толщиной до 6 мм сформированных на твердой, прочной основе. Кроме того, избыточная гетерогенность сплава Б83, и, особенно, присутствие в мягкой матрице (α -твердый раствор сурьмы в олове) слабо связанных с ней интерметаллидных соединений, представляющих собой крупные (до 200 мкм) кристаллы твердого раствора на основе химического соединения SnSb (β -фаза) и игольчатые частицы Cu_3Sn (γ -фаза), обуславливают его относительно невысокую износостойкость и усталостную прочность [2]. Улучшение свойств данного сплава может быть достигнуто за счет применения модифицирующих добавок и армирующих частиц, обеспечивающих измельчение и равномерное распределение указанных структурных составляющих в матрице [3].

В настоящей работе антифрикционные покрытия получали экономичным процессом дуговой наплавки на подложках из низкоуглеродистой стали (рис. 1).

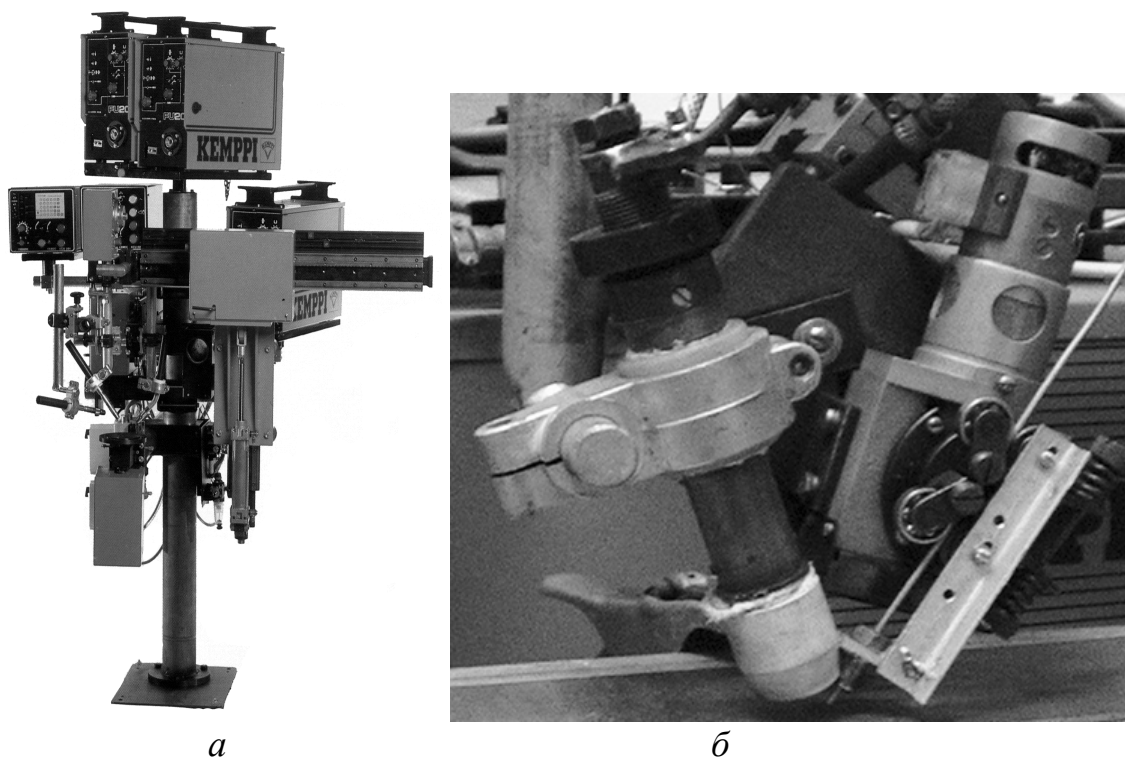


Рис. 1 – Установка КМ-50 (а) и сварочная головка (б) для процесса дуговой наплавки антифрикционных покрытий

В качестве присадочного материала применяли разработанные и изготовленные методом горячей экструзии наплавочные прутки из сплава Б83 системы Sn-Sb-Cu, содержащие субмикронные частицы бора (В) и карбида бора (B_4C), а также частицы карбида кремния (SiC) микронного размера [4]. Исследована структура и триботехнические свойства сформированных покрытий. Установлено, что наибольший эффект от присутствия субмикронных керамических частиц (например, В, B_4C) в покрытиях на основе сплава системы Sn-Sb-Cu, полученных на стальной подложке процессом дуговой наплавки, достигается при малых удельных давлениях (до 0,33 МПа), в котором наблюдается снижение до 60% значения коэффициента трения и стабилизация процесса трения вследствие формирования из продуктов износа КМ и контртела мелкодисперсных промежуточных слоев, содержащих в ряде случаев углеродные структуры. Влияние частиц микронного размера (например, SiC) проявляется при удельных давлениях свыше 0,46 МПа, где они выполняют роль воспринимающих нагрузку на поверхность трения

опор, ограничивающих пластическую деформацию и препятствующих механическому уносу материала матрицы в процессе сухого трения скольжения, что позволяет расширить диапазон трибоагрессии (увеличить нагрузочную способность, скорости скольжения) и уменьшить с $2,73 \cdot 10^{-5}$ до $1,85 \cdot 10^{-5}$ г/м интенсивность изнашивания. Анализ изменений значений коэффициентов трения, интенсивности изнашивания и коэффициентов стабильности изготовленных образцов в зависимости от удельного давления показывает целесообразность для достижения оптимального сочетания триботехнических характеристик (снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения на 38% и в 2 раза соответственно) не только модифицирования структуры сформированных процессом дуговой наплавки покрытий из сплавов на основе сплава системы Sn-Sb-Cu субмикронными керамическими частицами, но и введения крупных высокопрочных армирующих частиц, препятствующих разрушению интерметаллидов под действием высоких удельных давлений за счет снижения на них нагрузки.

Литература

1. Газиев, Р.Р. Ремонт подшипников скольжения компрессоров с применением газопламенного напыления / Р.Р. Газиев и др. // Нефтегазовое дело. – 2012. – №5. – С. 236–245.

2. Барыкин, Н.П. Влияние структуры баббита Б83 на интенсивность износа трибосопряжений / Н.П. Барыкин, Р.Ф. Фазлыяхметов, А.Х. Валеева // Металловедения и термическая обработка. – 2006. – №2. – С.44–46.

3. Калашников, И.Е. Трибологические свойства композиционных материалов на основе баббита Б83, полученных методом порошковой металлургии / И.Е. Калашников и др. // Металлы. – 2016. – № 4. – С. 101–107.

4. Калашников, И.Е. Получение наплавочных прутков из антифрикционного композиционного материала на основе баббита Б83 методом экструзии / И.Е. Калашников и др. // Перспективные материалы. – 2016. – №9. – С. 70–77.

Ковальов М.Ф., Головащук М.В. Національний транспортний університет,
Кулижський В.М., Лопата В.М. Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ,
Ніколайчук В.Я. Вінницький національний

ЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ВІДНОВЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЇХ ЯКОСТІ І РЕСУРСУ ВІДРЕМОНТОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

Покриття, отримані електродуговим напиленням, з деяким припуском піддають механічній обробці (МО) [1–3]. Основними видами МО напилених покриттів є різання і шліфування [1, 3]. Для обробки покриттів використовують швидкорізальний і твердосплавний інструмент. Знання властивостей покриттів, отриманих електродуговим напиленням, дозволяє виконувати їх МО з мінімально можливими трудовитратами і отримати необхідну чистоту поверхні. Структурні особливості і фазовий склад покриттів обумовлюють вибір методів і режимів їх МО [1, 3]. Спосіб обробки напилених покриттів залежить від їх твердості. Покриття з твердістю 35–40 HRC можна обробляти на металорізальних верстатах твердосплавним інструментом. Використання твердосплавного інструменту дає кращу чистоту обробленої поверхні.

Покриття з твердістю до 40 HRC обробляються різцями з швидкорізальних сталей на наступних режимах [1, 3]: подача $S = 0,05–0,25$ мм/об.; глибина $t = 0,1–0,4$ мм; швидкість різання $V = 20–30$ м/хв. Оптимальними геометричними параметрами різців є: передній кут $\gamma = 0–(-5)^\circ$; задній кут $\alpha = 6–8^\circ$; кут в плані $\phi = 30–90^\circ$; радіус при вершині $r = 0,1–0,2$ мм. При використанні різців з пластинами із твердих сплавів ВК2, ВК3, ВК4 і ВКБ режими обробки можуть бути жорсткішими: $V = 75–90$ м/хв. при подачі $S = 0,15$ мм/об. (попередня обробка); $V = 90–105$ м/хв. при подачі $S = 0,08$ мм/об. (чистова обробка). Режими МО покриттів, отриманих електродуговим напиленням, приведені в табл. 1.

Механічну обробку покриттів слід починати на буртиках і в кутах, з обточування потовщень, використовуючи для цього різці із закругленою різальною кромкою. У усіх випадках при токарній обробці різець повинен рухатися від покриття на необроблену ділянку, щоб уникнути підривання покриття. Напилені покриття при свердлінні, струганні, фрезеруванні і обробці напилком не можна піддавати навантаженням, що вигинають і розтягують, і навантаженням, що прагнуть відірвати покриття від основи. Якщо в деталі з покриттям треба просвердлити отвір, то він по можливості

повинен починатися в основному металі. Для цього отвір в покритті необхідно роззенковувати під кутом 45°.

Таблиця 1 – Режими механічної обробки покриттів, отриманих електродуговим напиленням

Режим обробки	Швидкість різання, V м/хв.	Подача, S , мм/об.	Глибина різання, t , мм
Чернова	40–60	0,06–0,10	0,10–0,30
Чистова		0,06–0,08	0,06–0,10

Обробка покриттів з твердістю > 40 HRC або чистова обробка покриттів здійснюється інструментом із гексаніта [1, 3]. Загальноприйнятим правилом при чистовому обточуванні покриттів є установка різця дещо вище за центр деталі, що дозволяє звести до мінімуму задній кут різця. Величина зміщення різця вище за центр деталі підбирається експериментально до отримання задовільної якості обробки. Для поліпшення чистоти обробленої поверхні обробку здійснюють із застосуванням емульсола [4].

Шліфування напилених покриттів здійснюється карборундовим або алмазним інструментом [1, 3]. Для шліфування карборундовим інструментом використовуються круги КЗ зернистістю М25, М40 і твердістю СМ1-СТ1. Попереднє шліфування алмазним інструментом здійснюється кругами на металевих зв'язках М016, М013, МВ1 з алмазами АСКМ, АСК, АСВ зернистістю 250/200, 200/160. Для фінішної обробки використовують алмазні круги на органічній зв'язці Б1 з алмазами АСО зернистістю 40/28, 28/20. Режими круглого шліфування: швидкість круга – 30–35 м/хв; швидкість деталі – 25–32 м/хв; подовжня подача – 1,0–1,5 м/хв; поперечна подача – 0,006–0,15 мм/об. (0,015 – при попередньому шліфуванні; 0,006 – при чистовому). Режими плоского шліфування: швидкість круга – 30–35 м/хв.; подовжня подача – 18 м/хв.; поперечна подача – 1,8 мм/об.; глибина шліфування – 0,01 мм. Шліфування виконується при охолодженні. При шліфуванні використовують алмазні круги із зернистістю 147–27 мкм, глибина різання 2,5–12,5 мкм в умовах подачі круга при поперечному колюванні з амплітудою 1–2 мм, окружна швидкість круга 5–33 м/с. Чистову обробку поверхонь (не більше 0,2 мкм) здійснюють притиранням за допомогою алмазної пасти. Тиск притирання 0,14–0,175 МПа, швидкість руху притирання 30,5–91,5. Структура і властивості поверхневого шару в результаті МО [1, 3] змінюються в серед-

ньому на глибину 0,1–0,7 мм. Структура в цьому випадку набуває спрямовану будову (текстуру), а твердість збільшується на 30–40%.

Окрім МО покриттів, отриманих електродуговим напиленням, застосовують хіміко-термічну (ХТО) і термо-механічну обробку (ТМО) [5–7]. Термічно оброблені сталі, що мають твердість 40–45 HRC, в процесі наклепання збільшують її на 5–10%. Шляхом об'ємної пластичної деформації можна підвищити модуль пружності матеріалу покриття [8]. Теплові і хімічні дії сприяють поширенню структурних перетворень углиб матеріалу відновлюваної поверхні.

Більшість способів обробки відновлених поверхонь з покриттями, отриманими електродуговим напиленням, мають відносно високі температури і тривалість обробки. Високі температури, як правило, негативно позначаються на "об'ємних" властивостях. Перевагою МТО є максимальна відтворюваність механічних властивостей покриттів [5–7]. Це пов'язано з тим, що МТО обробка відноситься до імпульсних технологій, тобто температура і тиск діють імпульсно і тривалість їх дії складає від 0,02 до 0,4 с [7]. Механо-термічна обробка покриттів, отриманих електродуговим напиленням, характеризується [5–7]: високою продуктивністю (0,01–0,015 м²/хв.), малою зоною термічного впливу на матеріал деталі (0,2–1,0 мм), відсутністю необхідності у використанні захисних середовищ, можливістю отримання рівномірних шарів в діапазоні товщини від 0,5 до 4 мм, високою мірою автоматизації і сприятливим санітарно-гігієнічними умовами здійснення технологічного процесу [5–7]. Оптимальною можна рахувати швидкість обробки 0,014–0,02 м/с. Міцність зчеплення у вказаному діапазоні швидкостей складає 150–250 МПа [5–7]. МТО зменшує пористість покриттів покриттів, отриманих електродуговим методом,

Література

1. Клименко С.А. Точение износостойких защитных покрытий / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский, П.П. Мельничук. – К. : Техніка, 1997 – 146 с.

2. Кондратьев, В.А. Особенности назначения припуска на механическую обработку при восстановлении деталей / В.А. Кондратьев, М.В. Кондратьев // Иновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса : межвуз. сборн. науч. тр. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2005. – Вып. 3. – С. 132–134.

3. Кондратьев, В.А. Перспективные способы механической обработки восстанавливаемых деталей / В.А. Кондратьев, М.В. Кондратьев // Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса : межвуз. сборн. науч. тр. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2005. – Вып. 4. – С. 6–9.

4. Пантелеенко, Ф.И. Восстановлению деталей машин: Справ. / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.

5. Капуткина, Л.М. Термомеханическая обработка металлов и сплавов : уч. Пособие / Л.М. Капуткина, С.Д. Прокошкин, С.Л. Добаткин. – М. : Интермед Инжиниринг, 2004. – С. 220–240.

6. Кершенбаум, В.Я. Механо-термическое формирование поверхностей трения / В.Я. Кершенбаум. – М. : Машиностроение, 1987. – 232 с.

7. Электроконтактное упрочнение как механотермической метод управления качеством поверхности // Тематич. сб. «Материалы, технологии и оборудование для восстановления деталей машин». – Мн. : УП «Технопринт», Новополоцк, ПГУ, 2003. – С. 251–254.
Шнейдер, Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: Справ. // Ю.Г. Шнейдер. – С-Пб. : Политехника, 1998. – 414 с.

Колесник М.А., Крикун О.П. Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

СУТНІСТЬ ПРИНЦИПУ УЗГОДЖЕННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДЕТАЛЕЙ ЦПГ

Стосовно до трибосистеми, якими по праву можна вважати поршневий двигун в цілому і його ЦПГ зокрема, цей принцип можна охарактеризувати як принцип узгодження або принцип трибоадаптивності. Оскільки сам процес тертя являє собою приклад дисипативної самоорганізації, при якій робота вузла тертя при створенні відповідних умов може протікати з мінімальними втратами енергії і матеріалу, застосування принципу узгодження до деталей, що труться і змащує їх матеріалами є найбільш ефективним. Цей принцип має на увазі досягнення оптимального функціонування трибосистеми з мінімізацією енерго- і матеріалозатрат

(мінімумом тертя і зношування) на основі врахування та узгодження за певними правилами внутрішніх показників і властивостей структури (форми, профілю, твердості, шорсткості і т.п.) з характером зміни зовнішніх факторів (кінематики, зовнішнього навантаження, в'язкості мастила, температури і ін.).

Без урахування зазначеного принципу в даний час, в умовах зрослих рівнів форсування ДВС з одного боку і зробити більш жорсткими вимоги до енерго і ресурсозбереження з іншого, вже неможливо уявити проектування сучасних конкурентоспроможних виробів двигунобудування. Особливість практичного застосування принципу узгодження до трибосистеми полягає в тому, що отримання ефективних технічних або технологічних рішень, які мінімізують, зокрема, втрати на тертя і зношування, в конкретному вузлі тертя кожен раз вимагає ретельного вивчення характеру зовнішніх впливів і встановлення їх зв'язку з внутрішніми властивостями структури (визначальними показниками і характеристиками деталі і матеріалу). Основне загальна вимога принципу: внутрішні властивості структури (тобто деталі і матеріалу) повинні бути узгоджені з характером зовнішніх впливів на цю структуру. Приймати і враховувати цю вимогу на якісному рівні, в загальному, не складає великих труднощів. Набагато складніше буває отримати кількісні результати застосування принципу, що виражаються в призначенні раціональних довжин, висот, показників твердості, законів зміни показника за напрямками, побудови зворотних зв'язків і т.п.

Для досягнення кількісного результату в кожному випадку потрібно рішення певної творчої завдання, пов'язаної з встановленням аналітичної кількісної взаємозв'язку між внутрішнім показником і цільовою функцією, в якості якої в даному випадку розглядаються сила тертя (або прямим чином впливає на неї інша величина) і знос.

На рис. 1 можна побачити типовий приклад застосування принципу узгодження на якісному рівні (тобто на рівні прийняття співвідношення «більше-менше») для раціонального конструювання спідниці поршня ДВС, а саме: призначення різних довжин і овальності спідниці поршня на протилежних (в площині гойдання шатуна) її сторонах.

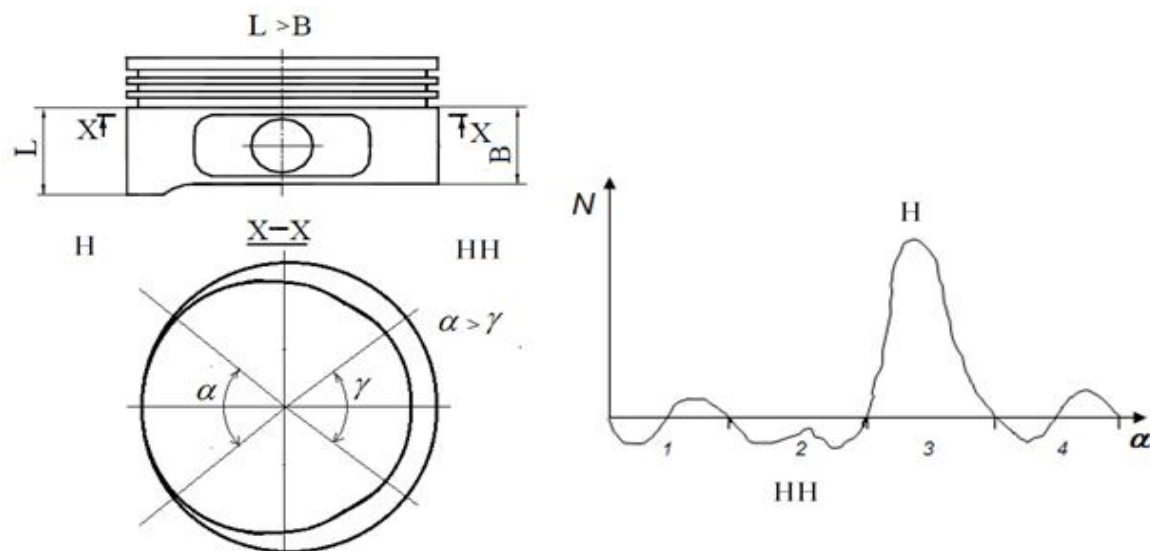


Рис. 1 – Типовий приклад застосування принципу узгодження на якісному рівні: призначення різних довжин і овальності спідниці поршня на протилежних (в площині гойдання шатуна) її сторонах

У цьому технічному рішенні профіль спідниці поршня виконаний асиметричним в повній відповідності з асиметричним характером зміни бічної сили поршня N на найбільш енергетично важливих тактах (2 і 4: «Стиснення» і «Робочий хід»). Результат застосування такого підходу до профілізації призводить до зниження тертя, а також більш рівномірному і помірному зношуванню поршня.

Коломиец В.В., Ридный Р.В., Карпов Д.В.
Харьковский НТУ сельского хозяйства
им. Петра Василенко, Харьков, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗЦОВ ИЗ ПСТМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА БОРА

Проведенными опытами и производственной практикой установлено, что обработка деталей из закаленных сталей и других труднообрабатываемых материалов резцами из ПСТМ на основе нитрида бора обеспечивает повышение производительности труда в два-три раза. При этом достигается требуемая точность обработки и низкая шероховатость обработанной поверхности [1]. Стойкость резцов из ПСТМ типа эльбор-Р и гексанит-Р значительно превышает

ет стойкость резцов из твердых сплавов при наружном точении и расточке отверстий в одинаковых условиях.

Эффективность применения резцов из ПСТМ на основе нитрида бора увеличивается при большей трудности обработки, особенно при расточке отверстий малых диаметров вместо операции координатного шлифования. Производственное внедрение чистового точения деталей с высокой твердостью материала резцами из эльбора-Р и гексанита-Р показало, что этот процесс является более прогрессивным, чем способы финишной обработки. При внедрении резцов из ПСТМ на основе нитрида бора в каждом конкретном случае необходимо установить оптимальные геометрические параметры режущей части резцов и оптимальные режимы резания, при которых стойкость резцов будет максимальной и будут выполнены требования по точности и качеству обработки деталей повышенной точности. Чистовой обработке резцами из эльбора-Р и гексанита-Р, предварительно обрабатываемых по 8–9 качеству точности и с шероховатостью Rz 5–7 резцами из твердых сплавов на оптимальных режимах резания с оптимальными геометрическими параметрами для обработки каждого материала. При этом требуется достигать высокую производительность обработки и малый расход инструмента, чтобы достигать эффективности и предварительной обработки.

Геометрические параметры резцов и оптимальные режимы обработки резцами из эльбора-Р и гексанита-Р приведены в табл. 1, 2. Обработка резцами из ПСТМ на основе нитрида бора ведется на станках токарной и расточной групп типа: 16К20П, А616П, 1В616, 1И611 и 2В440, а также импортных станках типа DOOSAN 700XLY с применением ПО ESPRIT и обрабатывающих центрах повышенной точности VTS 1620M [3].

Детали из чугунов различных марок обрабатываются со смазочно-охлаждающей жидкостью УКРИНОЛ-1, что увеличивает стойкость инструмента. Детали из закаленных сталей обычно обрабатывают без применения СОЖ, так как резцы из ПСТМ на основе нитрида бора обеспечивают требуемую точность и качество обработки и заменяют процесс финишной обработки взамен операции чистового шлифования [4].

Таблица 1 – Рекомендуемые геометрические параметры резцов из эльбора-Р и гексанита-Р при непрерывном и прерывистом точении и расточке

Геометрические параметры резцов	Обрабатываемый материал				
	P18, P6M5, У8А, У10	X12M, ХВГ, ШХ9	20Х, 40Х, 12ХН3А	30ХГСА, 38ХМЮА	СЧ18, СЧ28
	марка ПСТМ и вид обрабатываемой поверхности				
	эльбор-Р – непрерывн. гексанит-Р – прерывн.		гексанит-Р – прерывная и непрерывная		
Передний угол γ°	-(10–15) -10		-(8–12) -8	-10 -10	
Задние углы $\alpha^\circ, \alpha_1^\circ$	10–15 18–20		10–12 16–18	10 20	
Главный угол в плане φ°	40–45 45–50	35–40 40–45	35–40 40	40 40	
Вспомогат. угол в плане φ_1°	15–20 10–15		15–20 10	20 15	
Длина зачистного резания, мм	0,2–0,3 0,10–0,15		0,2–0,3 0,15–0,20	0,3–0,4 0,15–0,25	

Числитель – точение, знаменатель – растачивание; $\lambda = 0^\circ$.

Таблица 2 – Рекомендуемые режимы резания при обработке резцами из ПСТМ

Режимы резания	Вид обработки	Обрабатываемый материал, твердость			
		P18, P6M5, У8, X12M, ШХ15 X12Ф1, 5ХНМ HRC 58–64	20Х, 40Х, 12ХН3А HRC 48–55	30ХГСА, 38ХМЮА HRC 35–50	СЧ 18, СЧ 28, НВ 120–180
Скорость резания, v , м/мин		70–90 60–70	90–120 70–80	120–150 80–100	500–600 300–400
Подача S , мм/об	точение	0,04–0,08 0,07–0,10		0,04–0,10 0,04–0,07	0,07–0,15 0,07–0,15
	растачива- ние	0,02–0,05 0,04–0,07	0,02–0,1 0,04–0,1	0,02–0,1 0,04–0,07	0,05–0,1 0,07–0,15
Глубина резания t , мм	точение	0,1–0,3 0,15–0,3		0,1–0,4 0,15–0,4	0,2–0,4 0,2–0,6
	растачива- ние	0,1–0,15	0,1–0,2		0,2–0,4
Ориентиров. стойкость, T , мин		120–140 60–80	150–180 80–120	150–200 100–120	240–360 150–200

Числитель – непрерывное точение, знаменатель – прерывистое точение

Изношенные в процессе обработки резцы из ПСТМ на основе нитрида бора затачиваются и доводятся до шероховатости поверхно-

сти режущей части по Ra 0,08–0,16 мкм. Заточку резцов [5] рекомендуется проводить централизованно на универсально-заточных станках типа 3А64Д в трех поворотных тисках кругами типа АЧК, АПВ 125х32х3, 150х32х3 на связках Т02, Б1, ТМ2 с зернистостью АСВ, АСП, АСР 100/80–50/40, 150% концентрации. Режим заточки: $v_{кр} = 25–30$ м/с; $S_{пр} = 0,5–1,0$ м/мин; $S_{поп} = 0,005–0,01$ мм/дв. ход. Доводка резцов осуществляется алмазными кругами на связке Б3 с зернистостью АСМ 40/28 с концентрацией 100%. Режим доводки: $v_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 0,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,005$ мм/дв. ход.

Опыт внедрения резцов из сверхтвердых материалов типа эльбор-Р и гексанит-Р показывает, что при соблюдении приведенных требований и рекомендаций их окупаемость происходит при повышенных объемах производства деталей с большим экономическим эффектом.

Литература

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014 – 608 с.

2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общей ред. Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. В 10 т. – Т. 3. Новиков, Ф.В. Резание материалов лезвийными инструментами / Ф. В. Новиков, А.В. Якимов, В.В. Коломиец и др. – Одесса : ОНПУ, 2003. – 550 с.

3. Новиков, Ф.В. Оптимальные решения в металлообработке / Ф.В. Новиков, В.Р. Жовтобрюх, Г.В. Новиков. – Днепр : Лира, 2017. – 476 с.

4. Коломиец, В.В. Новые инструментальные материалы и области их применения / В.В. Коломиец. – К. : УМК ВО, 1990. – 64 с.

5. Кремнев, Г.П. Типовые технологические процессы механической обработки деталей машин / Г.П. Кремнев, Ф.В. Новиков, В.М. Колесник. – Лира : Днепр, 2017. – 252 с.

Копылов В.И., Ерко А.А. Саленко О.Ф. Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ
Кузин О.А. Национальный университет «Львовская политехника»,
Кузин Н.О. Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта, Львов, Украина

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ НА РАЗРУШЕНИЕ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ИЗНОСА

Влияние границ раздела разного происхождения на процессы деформации и разрушения сталей, например, при трении, остается актуальной задачей физического материаловедения. В значительной степени это связано с тем, что в существующих моделях границ зерен строение и структурно-фазовое состояние приграничных зон зерен недостаточно учитываются [1, 2].

Целью работы является разработка физической модели, которая бы описывала изменение строения приграничных зон зерен в условиях действия внешних нагрузок и влияние этого состояния на элементарный механизм межзеренного разрушения.

Состояние границы зерна и приграничного слоя следует рассматривать как функционально-градиентную структуру, состоящую из нескольких зон. Первая зона с повышенной плотностью линейных дефектов формируется при переходе от однородного распределения свойств в объемной части кристаллического тела вследствие массового выхода дислокаций на поверхность. В первой зоне закладывается неоднородность геометрических и энергетических свойств, которые проявляются в следующих зонах приграничного слоя в зависимости от стадии эволюции дислокационной подсистемы. Одним из главных факторов, который определяет свойства границ, является их пористая структура. При действии внешних нагрузок в пористой структуре происходят внутренние превращения, и в зависимости от свободного объема (пористости) и зернограничных дефектов одна и та же граница имеет разные свойства. Мерой отклонения от равновесия является величина свободного объема, который определяется удельным количеством пустот на единицу площади поверхности границы:

$$v_f = V_f/S \quad (1)$$

где V_f – абсолютный объем межчастичных пустот в материале структурного элемента в границах предельного слоя, S – площадь границы структурного элемента.

В качестве пустот могут быть поры, вакансии, вакансионные кластеры микро- и наноскопических размеров. Существует некоторый критический свободный объем v_f^k , при котором граница превращается в две невзаимодействующие поверхности. В определенном интервале свободного объема может существовать не одна, а несколько возможных неравновесных границ. В процессе межзеренного разрушения материала образуются новые поверхности, при этом энергия разрушения определяется соотношением:

$$\gamma_1^* = 2\gamma_s - \gamma_B, \quad (2)$$

где γ_s – поверхностная энергия трещины; γ_B – свободная энергия границы зерна.

В связи с тем, что энергия границы зерна γ_B зависит от зернограничной структуры, энергия межзеренного разрушения γ^* также зависит от структуры. В случае вязкого разрушения, представленное уравнение (2) переходит в уравнение $\gamma_2^* = 2\gamma_s - \gamma_B + \gamma_{II}$, где γ_{II} – энергия, которая тратится на пластическую деформацию, т.е. $\gamma_1^* < \gamma_2^*$.

Межзеренное разрушение сплавов происходит в следствие концентрации напряжений, которая обусловлена развитием зернограничного проскальзывания на разных нерегулярностях произвольных границ, в частности на тройных стыках [3, 4]. Сопротивление разрушению связано с энергией границ зерен, то есть с изменением

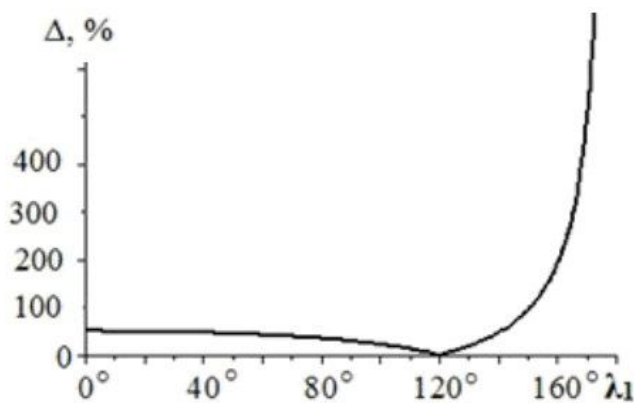


Рис. 1 – Зависимость прироста энергии границ зерен в области тройного стыка от угла между зернами λ_1

энергии на границах в зависимости от размера зерен.

На рис. 1 представлены результаты исследования зависимости между энергиями границ зерен (относительная энергия) в тройных стыках на примере конструкционного материала (углеродистая сталь) после плазменной поверхностной обработки.

Установлено, что там, где сформирована разнотернистая структура (зона ближе к поверх-

ности), встречаются стыки, у которых границы существенно отличаются по энергиям. Это стыки, углы между границами, в которых близки к 180° и острым углам. Оказалось, что эта зона несмотря на более высокую твердость и микротвердость, имеет износостойкость ниже, чем зоны, в которых есть стыки, где отсутствуют такие углы. Рост количества границ зерен, которые расположены напротив острых и тупых углов с большой разницей в энергии увеличивает интенсивность изнашивания отдельных зон слоя плазменного упрочнения (рис. 2, 3).

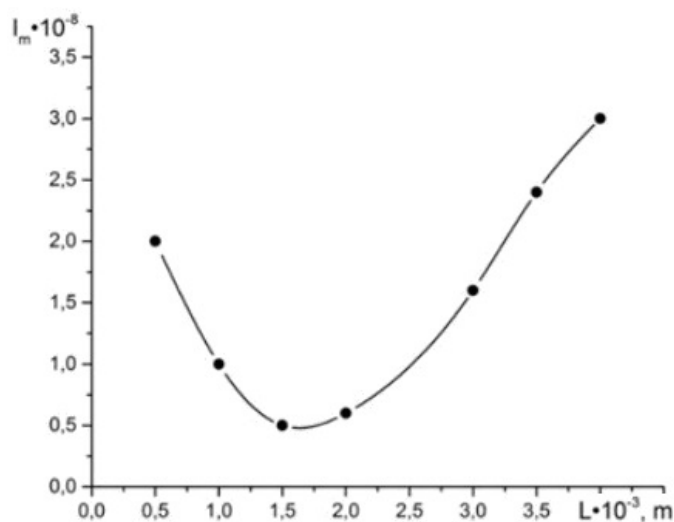


Рис. 2 – Интенсивность изнашивания на разной глубине зоны плазменного упрочнения конструкционного материала

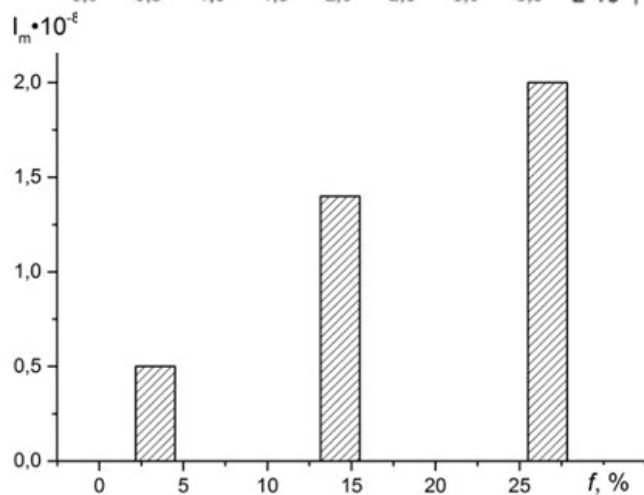


Рис. 3 – Зависимость интенсивности изнашивания от доли тройных стыков с высоким градиентом энергии границ зерен в зоне плазменного поверхностного упрочнения

В связи с этим в пятнах контакта при действии знакопеременных нагрузок материал этой зоны быстрее переходит от этапа формирования рассеянных к локализованным повреждениям, что приводит к уменьшению его износостойкости. Повышение интенсивности износа в зонах, расположенных на расстоянии порядка 1,5 мм от поверхности соответствует уменьшению твердости и микротвердости материала этих зон после плазменного упрочнения.

При деформации доля напряженных стыков повышается. Энергия стыков выше, чем границ зерен. Их структура характеризуется большим свободным объемом по сравнению с границами зерен. Микротвердость тройных стыков на 20% ниже микротвердости на границах, т.е. они более рыхлые. Поэтому структура, где присутствуют такие стыки имеет низкое сопротивление изнашиванию.

Литература

1. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия, проблемы и перспективы / В.Е. Панин, В.Е. Гриняев, С.П. Псахье // Физическая мезомеханика. – 2004. – №7. – С. 1–25.

2. Кузін О.А. Вибір параметрів технологічної обробки маловуглецевої сталі з використанням підходів механіки / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін // Поліграфія і видавнича справа. – 2012. – №2(58). – С. 124–131.

3. Кайбышев О.А. Границы зерен и свойства металлов / О.А. Кайбышев, Р.З. Валиев. – М. : Металлургия, 1987. – 214 с.

4. Koneva, N.A. Structure of triple junctions of grains, nanoparticles in them and bending-torsion in metal nanopolycrystals / N.A. Koneva, E.G. Kozlov, N.A. Popova. et all. // Mat. Sci. Forum. – 2008. – Vol. 584-586. – P. 269–274.

Коржов В.П., Зверев В.Н. Институт физики
твердого тела РАН, Черноголовка, Россия

МНОГОСЛОЙНАЯ ЛЕНТА ИЗ (Nb–Ti)-СПЛАВА ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МЕДИЦИНСКИХ МР-ТОМОГРАФОВ

МР-томография – это высокоинформативный безвредный для здоровья человека метод диагностики, использующий принцип магнитного резонанса ядер водорода – элемента, распространенного в теле человека. Первый в мире томограф со сверхпроводящим магнитом открытого типа с полем 0,35 Тесла был представлен в 1997 г. фирмой Toshiba. В наше время МР-томографы с использованием явления сверхпроводимости получают все большее распространение. В 2017 г. две модели томографов были построены в России:

полноразмерный МР-томограф с индукцией поля 1,5 Тл и «тёплым отверстием» диаметром 90 и длиной 170 см и компактный ортопедический томограф [1].

Нами предлагается твердофазная технология получения многослойной ленты Cu/Nb/Nb50Ti на основе сплава Nb–50%Ti для магнитных систем МР-томографов. Её разработка проистекает из востребованности сверхпроводящих магнитно-резонансных томографов (МРТ) в пределах РФ, о чем можно судить из плана Минпромторга по импортозамещению МРТ. К 2018 году импорт МРТ в Россию планировалось сократить с 95 до 47,5%. К сожалению это было на фоне удручающей для РФ мировой статистики 2017 года количества МР-томографов, введённых в эксплуатацию на плотность населения (*штук МРТ на 1 млн. жителей*): США – 35; Германия – 27; Япония – 46; Россия: ЦФО, включая Москву, – 3,2; Южный ФО – 1,4. Отсюда следует вывод, что рынок МРТ в России совсем не насыщен – это к вопросу о ~~масштабном производстве~~ ~~в РФ~~ ~~открытию~~ ~~отечественных~~ ~~МР-томографов~~ ~~был~~ ~~открыт~~ ~~в~~ ~~ФИАНе~~ ~~ещё~~ ~~в~~ ~~2011~~ ~~году~~. При изготовлении сверхпроводящей магнитной системы для МР-томографов используются медный кабель или шина с жилами из сплава Nb–50 мас.%Ti. Это деформируемый сверхпроводящий сплав с критической температурой 9,6 К, известный с начала 60-х годов прошлого столетия, ставший первым сверхпроводником промышленного производства для практического использования. Получение кабеля или шины любого назначения включает два трудоемких и дорогих технологических процесса: выплавку сплава нужного состава и получение многожильного проводника (провода или ленты) путем экструзии и последующего многократного волочения. ~~Разработка~~ ~~технологии~~ ~~получения~~ ~~компазитной~~ ~~ленты~~ ~~из~~ ~~сплава~~ ~~Nb50Ti~~ ~~не~~ ~~имеет~~ ~~проблемных~~ ~~этапов~~ ~~существующей~~ ~~технологии~~ ~~изготовления~~ ~~многожильной~~ ~~ленты~~ ~~и~~ ~~кабеля~~ ~~таких~~, ~~как~~ (1) выплавка сплава с последующим переделом его слитка в 6-гранный стержень, (2) длительный процесс получения из составной Cu/Nb50Ti-заготовки многожильной ленты или провода тонких сечений, (3) необходимость проводить многочасовой (до 300 ч) отжиг при 280–300 °С в вакууме или инертной среде уже готовой многожильной ленты или готового провода. ~~В~~ ~~данной~~ ~~области~~ ~~получения~~ ~~ленты~~ ~~из~~ ~~сплава~~ ~~Nb–50%Ti~~ ~~получали~~ ~~диф-~~ ~~фузионной~~ ~~сваркой~~ ~~(ДС)~~ ~~многослойных~~ ~~пакетов~~ ~~под~~ ~~давлением~~ ~~в~~ ~~ва-~~

кууме с последующей их прокаткой при комнатной температуре за 2 цикла. Сборка пакетов в 1-м цикле проводилась с использованием элементов U-образной формы из ниобия и Ti-фольг или, наоборот, элементов U-образной формы из титана и Nb-фольг. Затем собирались пакеты из 10, 20 и более U-элементов и соответствующего количества фольг. Режим сварки: 1050 °С, 10 мин, 16–17 МПа (рис. 1, а).

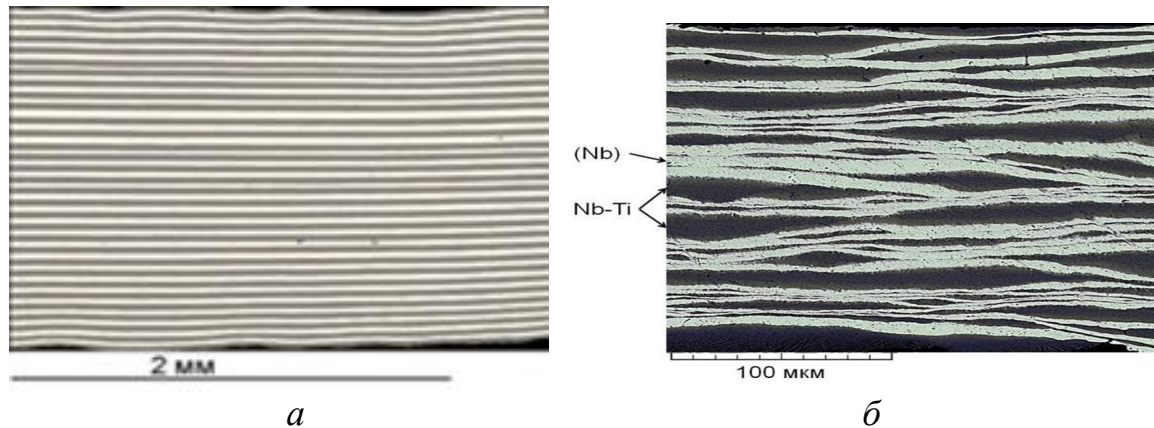


Рис. 1 – Поперечное сечение Nb/Ti-пакета после сварки в 1-м цикле (а) и микроструктура прокатанной из него ленты толщиной 0,2–0,25 мм (б)

После сварки пакеты прокатывали до толщины 0,2–0,25 мм и разрезали на отрезки нужной длины (рис. 1, б). Во 2-м цикле пакеты собирали уже из отрезков ленты после 1-го цикла, 2-х или 3-х Cu-пластин толщиной 0,15 мм и соответственно 2-х или 4-х Nb-фольг толщиной 20 мкм, прокладываемых между Cu-пластинами и «пачками» из нескольких отрезков ленты после 1-го цикла. Медные прокладки требовались для стабилизации сверхпроводящего состояния ленты, Nb-фольги – как диффузионные барьеры против взаимодействия меди с титаном из (Nb–Ti)-сплава при сварке: 900–950 °С, 1–2 ч, 16–17 МПа. Затем пакеты прокатывали до толщины 0,1 мм. На рис. 1 представлены структуры Nb/Ti-пакета после сварки в 1-м цикле из 30 Nb-фольг и 31 Ti-фольги соответственно светлого и серого цвета и микроструктура того же пакета после сварки в 1-м цикле из 30 Nb-фольг и 31 Ti-фольги соответственно светлого и серого цвета и микроструктура того же пакета после сварки в 1-м цикле (рис. 2) показывают, что взаимная диффузия между ниобием и титаном протекала практически за счет диффузии ниобия в титан. После ДС при 1050 °С в течение лишь 10 мин Ti-слой обогатился ниобием в количестве от 30 до 40 мас.% (см. рис. 2, б) в то время как в Nb-слое титан растворился в количестве <1 мас.%.

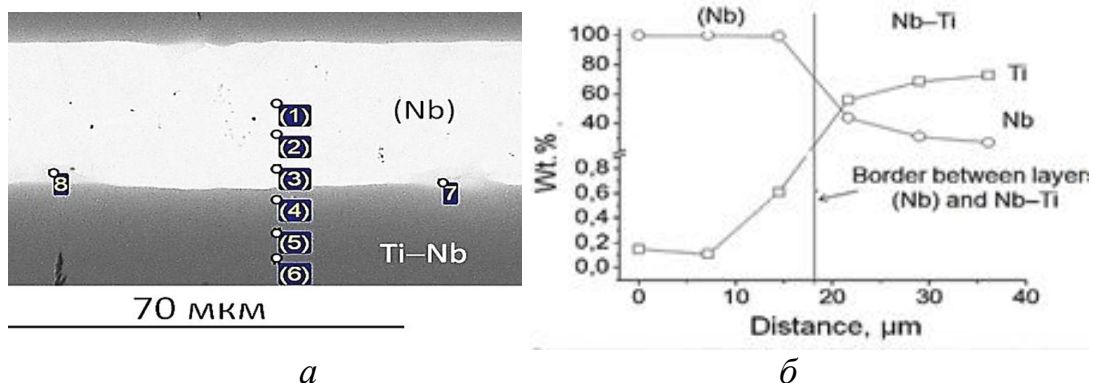


Рис. 2 – Результаты локального РС-анализа Nb/Ti-пакета после сварки: (Nb) – сплав Nb с 0,1–0,6 мас.%Ti; 1–8 – точки локального РС-анализа

На рис. 3 показаны структуры пакетов после 2-го цикла ДС с двумя наружными (а) и тремя (2 + 1 внутренний) стабилизирующими Cu-слоями (рис. 3, б). Между ними и сверхпроводящими объемами расположены тонкие Nb-фольги, служившие диффузионными барьерами в процессе их диффузионной сварки.

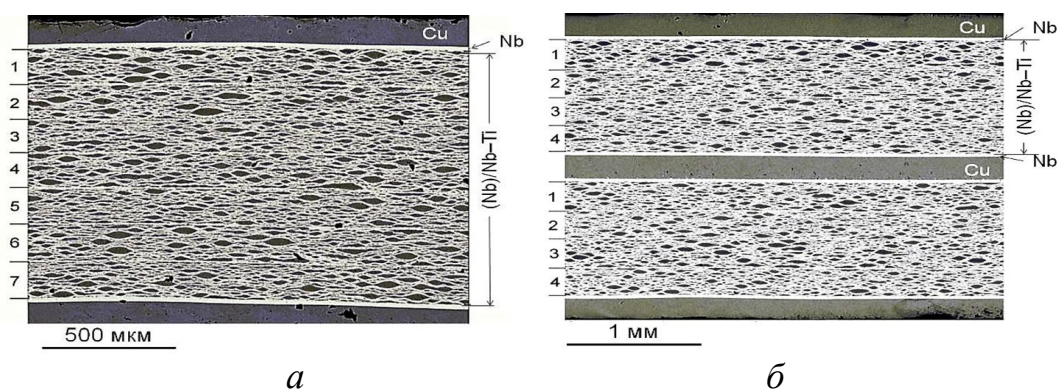


Рис. 3 – Поперечное сечение Nb/Ti-пакетов после ДС во 2-м цикле с двумя (а) и тремя (б) стабилизирующими Cu-прокладками: Nb – диффузионные барьеры; 1+2+...+7 и 1+2+3+4 – «пачки» из Nb- и Ti-фольг после 1-го этапа

На рис. 4 и 5 представлены соответственно результаты измерения ее токонесущей способности в сверхпроводящем соленоиде при 4,2 К и микроструктура ленты из сплава Nb–50 мас.%Ti. При параллельной ориентации магнитного поля соленоида и плоскости ленты ее критический ток I_C составил ~50 А/мм в магнитном поле 5 Тл.

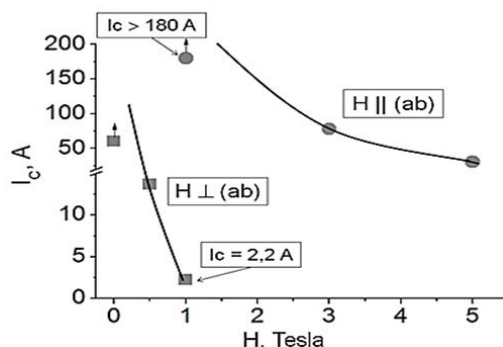


Рис. 4 – Зависимости критического тока I_C ленты из сплава Nb50Ti толщиной 0,1 и шириной ~1 мм от внешнего магнитного поля H сверхпроводящего соленоида

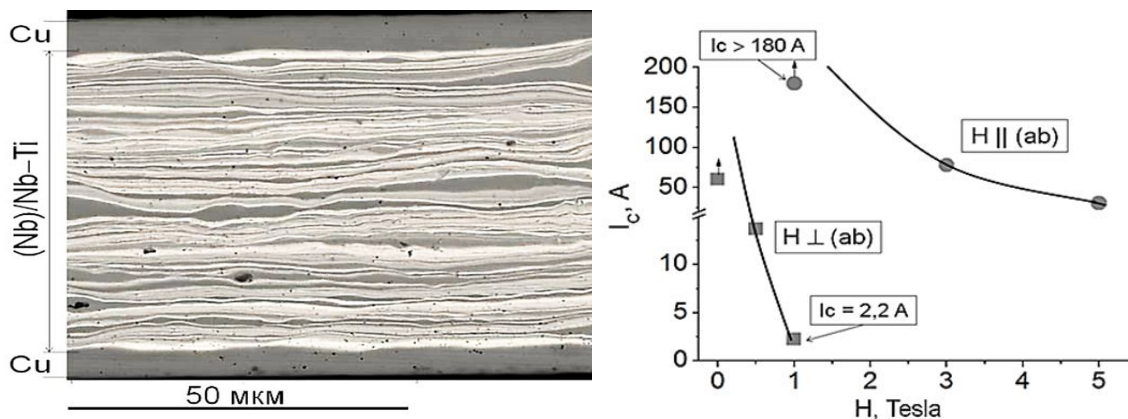


Рис. 5 – Микроструктура сверхпроводящей ленты толщиной 0,1 мм из пакета двумя наружными стабилизирующими Cu-обкладками

Литература

1. Демихов, Е.И. Первый отечественный сверхпроводящий магнито-резонансный томограф с полем 1,5 Тесла для высокоточной медицинской диагностики / Е.И. Демихов, В.В. Лысенко, Е.А. Костров и др. // Научное приборостроение. – 2017. – Т. 27, №1. – С. 19–23.

Кутепов А.Ю., Крень А.П., Гнутенко Е.В.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

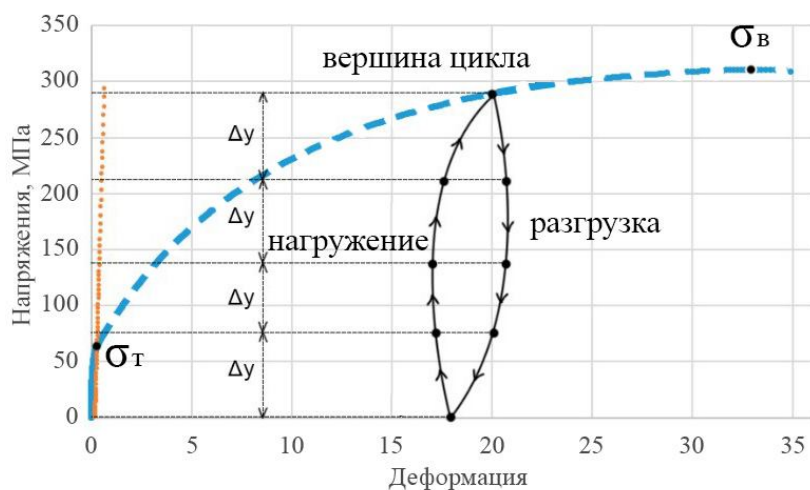
ИНДИКАЦИЯ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ

Определение уровня внутренних напряжений – важный аспект контроля качества теплозащитных никелевых покрытий, поскольку высокие уровни напряжений могут приводить к растрескиванию и отслаиванию покрытий.

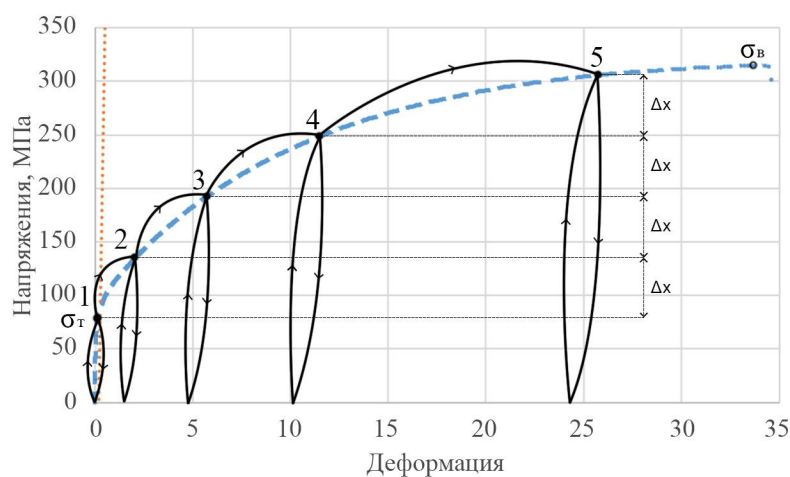
В работе исследована возможность установления градуировочных зависимостей, связывающих магнитоотрывное усилие Kf , действующие напряжения и толщину никелевого покрытия, а также установление характера влияния исходного уровня внутренних напряжений на Kf . Для этого проводились испытания образцов-имитаторов никелевых покрытий (никелевых пленок) на растяжение с использованием разрывной машины. Образцы изготавливались согласно ГОСТ

11701 пятью группами толщин в диапазоне от 200 до 800 мкм, по 2–3 ед. в каждой группе. Для создания нулевого уровня исходных внутренних напряжений был проведен отпуск пленок.

Измерение зависимости Kf от приложенных напряжений $\sigma_{ист}$ проводилось на циклах разгрузки и нагружения. Для каждого цикла формировался исходный уровень внутренних напряжений предварительной нагрузкой, уровни которой находились в диапазоне от предела текучести σ_T до предела прочности σ_B и назывались вершинами циклов. Пример цикла показан на рис. 1, а, где штриховая кривая – зависимость приложенных напряжений от деформации образца. Точка пересечения кривых одного цикла и кривой напряжение-деформация – вершина цикла.



а



б

Рис. 1 – Пример схемы расположения точек контроля и очередности циклов на графике напряжения-деформация

Испытания каждого образца представляли собой 5 циклов подряд. Вершины циклов располагались по возрастанию на равном удалении друг от друга Δx в диапазоне от σ_T до $0,95\sigma_B$. (рис. 1, б).

Величина Kf измерялась в промежуточных точках, которые располагались внутри циклов на равном удалении друг от друга Δu от вершины цикла до нуля (рис. 1, а). Δu определялись отдельно для каждого цикла.

Измерение Kf не только в вершинах циклов, но и в промежуточных точках позволило установить, что увеличение исходного уровня внутренних напряжений в образце приводит к уменьшению отрывного усилия на нуле цикла – т.е. к понижению начальной точки кривой зависимости Kf от $\sigma_{ист}$, а также делает саму кривую цикла более пологой (рис. 2). Из этого следует, что по отрывному усилию можно оценивать степень приближения к критическим значениям, при том, что в реальном изделии соотношение действующих напряжений неизвестно.

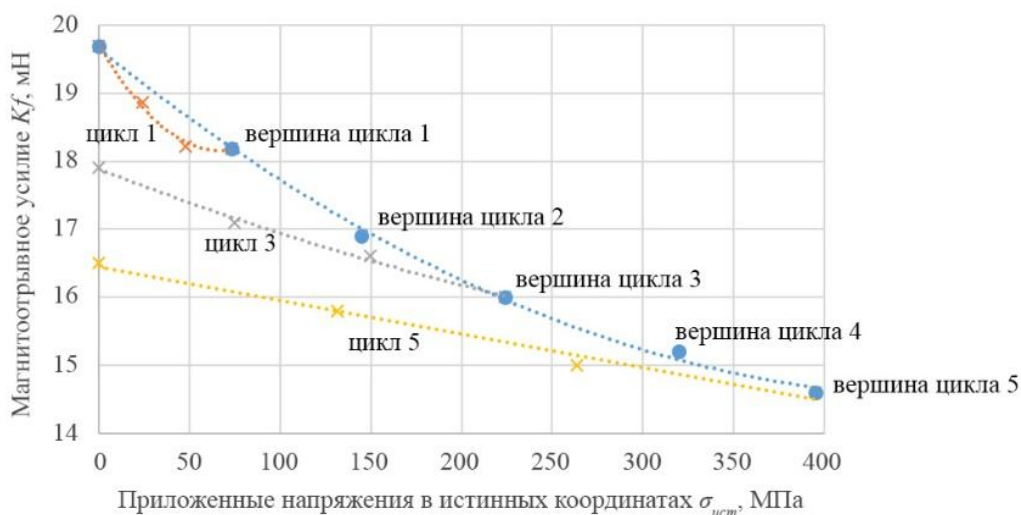


Рис. 2 – Циклы нагружения-разгрузки и кривая зависимости Kf от $\sigma_{ист}$

Получение данных Kf и $\sigma_{ист}$ для разных толщин, позволило предложить вид градуировочной зависимости для $\sigma_{ист}$. На рис. 3 представлена градуировочная поверхность, показывающая характер зависимости приложенных напряжений $\sigma_{ист}$ от толщины образца h и отрывного усилия Kf .

Таким образом, были проведены испытания образцов никелевых покрытий на растяжение. Испытания представляли собой циклическое нагружение образцов, в ходе которого измерялось отрывное усилие. Было показано, что отрывное усилие магнита зависит от толщины покрытия, приложенных напряжений и исходного уровня внутренних напряжений в образце. Была также показана возможность проводить индикацию степени близости значений приложенных напряжений к критическим.

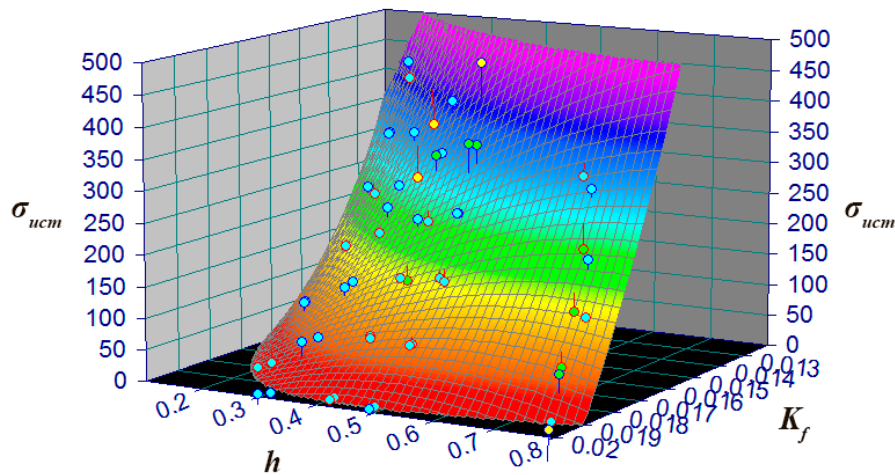


Рис. 3 – Поверхність $\sigma_{ист} = f(Kf, h)$

Лавріненко В.І. Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

ДО ПИТАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОКРИТТЯ ЗЕРЕН НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ У ШЛІФУВАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ

Для того, щоби шліфувальний круг з НТМ мав гарну різальну здатність, необхідно аби зерна виступали із зв'язки. Це є умовою необхідною, але недостатньою. Важливо, щоби зерна НТМ не тільки виступали, але і утримувалися у зв'язці. Нагадаємо, що зерна НТМ в залежності від своєї міцності мають різну морфологію. Чим зерна більш міцні, тим більш гладеньку поверхню вони м'ють, а відтак їх утриманню слід приділяти більше уваги. Так, більш міцні зерна потребують і більш міцної зв'язки, наприклад, не полімерну, а металічну. А як бути, коли не можна змінити зв'язку? Ось саме для таких проблемних випадків і можуть бути застосовані покриття зерен НТМ. Покриття зерен НТМ переважно здійснюється у вигляді металічного або скляного покриття зерен шліфпорошків для покращення їх утримання в зв'язуючому, або можливої зміни контактних процесів в зоні обробки, коли матеріал покриття природно попадає безпосередньо в зону різання. Звертаємо увагу, це все. Тобто є лише дві мети застосування покриття на зерна НТМ. Міф про те, що покриття зерен приймає участь у процесі знімання оброблюваного

матеріалу не має під собою ніякої основи. Зняття матеріалу здійснює лише алмаз або кубічний нітрид бору. Покриття у такому випадку стирається, що ми і бачимо на рис. 1.

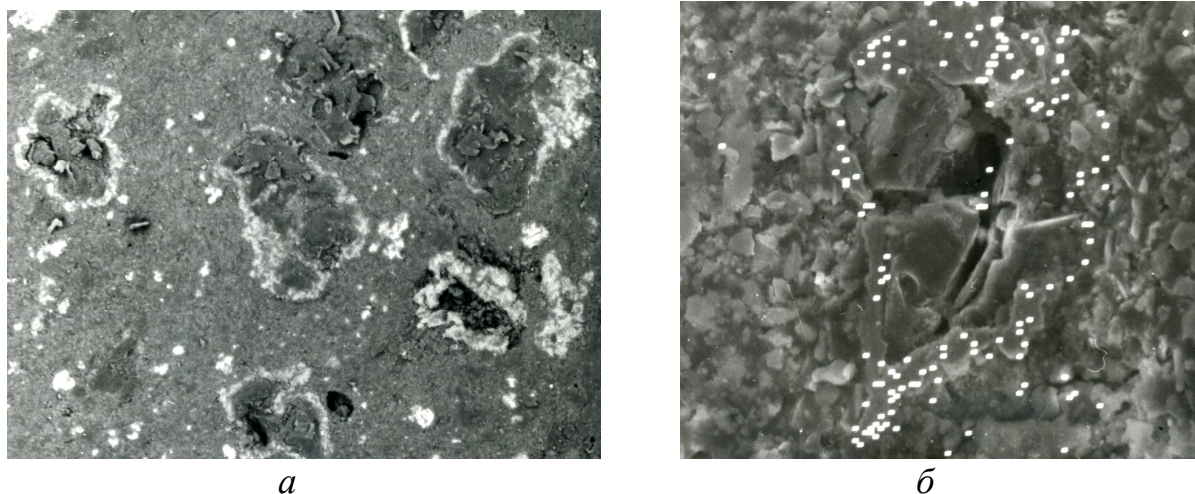


Рис. 1 – Стан алмазних зерен на різальній поверхні круга при шліфуванні кераміки ВОК71: світлим кольором вирізняється нікелеве покриття (а) і розподіл нікелю в покритті зерна (б)

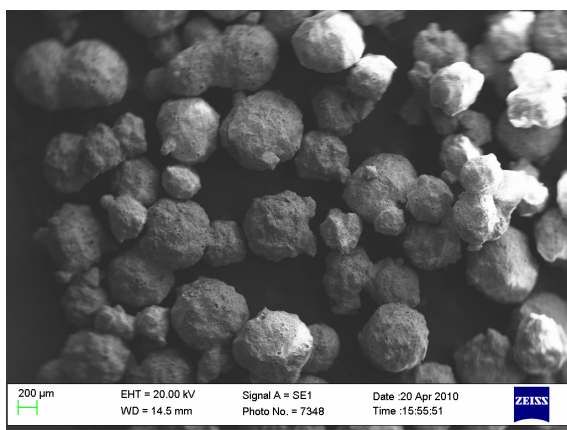
Металізація зерен НТМ переважно здійснюється хімічним або електролітичним способами. Metalli, що застосовуються для цього, мають слабе хімічне споріднення до вуглецю або воно зовсім відсутнє (мідь), тому, щільного хімічного адгезійного зв'язку між покриттям і зерном не виникає, а відбувається чисто механічне за Важливим фактором, що відбиває змочування є хімічна інертність металів по відношенню до алмаза и кубічного нітриду бору. В роботі [1] представлені метали, які є хімічно інертними до вуглецю, бору і азоту: Cu, Ag, Au, Ga, Ge, In, Sn, Pb, Sb, Bi (кут змочування 120–140°, адгезія ≈ 100 ерг/см²). Metalli, що хімічно взаємодіють з вуглецем, бором і азотом [1]: Ti, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, Si, B (кут змочування 0–50°, адгезія ≈ 2500 ерг/см²).

Найбільш технологічно вигідним є покриття зерен нікелем з деякими домішками, що наноситься електролітичним шляхом на зерна і, фактично, воно і є найбільш застосованим для покриття зерен НТМ. Зерна НТМ в кругах закордонних фірм здебільшого мають металізоване покриття. Металізація здійснюється, як і у випадку вітчизняних НТМ, покритих нікелем. Для кругів на полімерних зв'язках закордонні фірми застосовують покриття НТМ системою нікель-фосфор. Порівняльні данні з властивостей покриттів наведені нижче (табл. 1) [2].

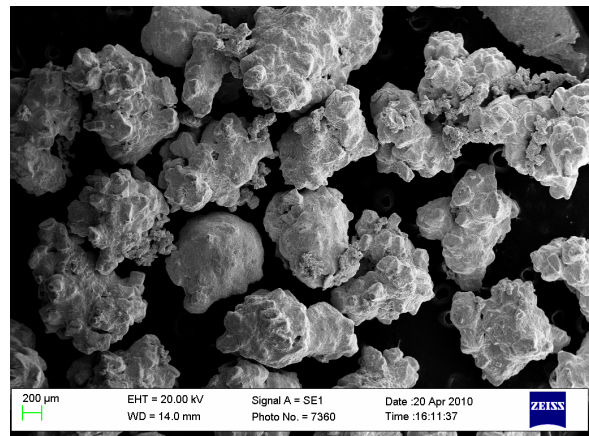
Таблиця 1 – Характеристики різних покриттів алмазних зерен

Властивості	Ni-покриття хімічним осадженням із застосуванням	Гальванічне нікелеве покриття
Вміст, % за масою	Ni (90-99) осада (8-10)	Ni більш 99,5
Температура плавлення, °C	890	1450
Коефіцієнт відбиття, %	40-50	–
Питомий електроопір, мкОм·м	0,60	0,85
Теплопровідність, Вт/(м·К)	4,40-5,65	–
КЛТР, 10^{-6} град ⁻¹	13,00	–
Густина, $\cdot 10^3$ кг/м ³	7,90	7,7
Твердість за Вікерсом, МПа	500 ± 50 (HRC 49)	150-250
Адгезія на алмазі, Н/мм ²	345-450	345-415
Відносне подовження, %	3-6	10-30
Напруження	Стиску	Розтягу
Показник магнетизму, %	4	37,5

Для склопокриття зерен кубічного нітриду бору переважно застосовують свинцевоборосилікатне скло системи $PbO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$. Порошки КНБ із склопокриттям здебільшого представлені у вигляді агрегатів, які складаються з декількох зерен, зв'язаних адгезійно-активним склом (рис. 2, а).



а



б

Рис. 2 – Загальний вигляд склоагрегатів кубоніта (а) і склоагрегатів, додатково покритих електрохімічною міддю

Для склопокриття алмазних зерен застосовується скло іншої системи, аніж для зерен КНБ, а саме – $Na_2O-B_2O_3-TiO_2-SiO_2$, розплав якого має високу змочувальну здатність та адгезію до алмазу. Для от-

римання склометалічного (СМ) покриття склоагрегати додатково металізуються – титаном (~9%, як дифузійне технологічне покриття), титаном і нікелем (~20%), титаном і міддю (~20% за масою) (рис. 2, б) [2].

Звернемо увагу на дві особливості покриття зерен НТМ вже з точки зору алмазно-абразивної обробки. Аналізувалися варіанти нанесення покриттів: склопокриття (С), металопокриття (М), склометалічне (СМ), металоагреговане (МА). Дослідження дозволили зробити однозначний висновок по першій особливості покриття: будь-яке покриття зерен НТМ призводить до підвищення висотних параметрів шорсткості обробленої поверхні. Це однаково стосується як кругів на металічних зв'язках, так і на полімерних. В цілому, можливо подати вплив покриття зерен на шорсткість в наступній послідовності (по мірі збільшення значень порівняльних коефіцієнтів параболістичності): (1,0) → МА (1,6) → С (1,8) → СМ (2,0) → М (2,2).

Вплив покриття алмазу на силові показники при продуктивності шліфування 660 мм³/хв. безвольфрамового твердого сплаву ТН20 наведено в табл. 2. Висновок по другій особливості: у всіх випадках покриття алмазу призводить як до зростання зусилля різання, так і до підвищення коефіцієнту абразивного різання (f_a), тобто погіршує силові показники обробки.

Таблиця 2 – Вплив покриття алмазів на силові показники обробки сплаву ТН20

Марка і покриття	q_p , мг/г	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	f_a	Питома робота шліфування, $A_{\text{пит}}$ (Вт·хв.)/мм ³
АС4	3,6	11	547	87	0,16	2,48
АС4 С	4,4	9	524	91	0,17	2,60
АС4 М	7,5	12	578	110	0,19	3,14
АС4 МА	1,4	13	595	113	0,19	3,22

Таким чином, покриття алмазних зерен може дати позитив – знизити знос кругів, але слід зважити на те, що при цьому підвищуються силова напруженість шліфування та шорсткість обробленої поверхні. Як наслідок, треба оцінювати що переважить: позитив чи негатив.

Литература

1. Найдич, Ю.В. Смачиваемость и контактное взаимодействие металлических расплавов с алмазом и кубическим нитридом бора /

Ю.В. Найдич, Г.А. Колесниченко, В.М. Перевертайло // Синтетические алмазы в промышленности. – К. : Наук. думка, 1974. – С. 32–36.

2. Лавріненко, В.І. Надтверді матеріали: посібник для допитливих / В.І. Лавріненко. – К. : Академперіодика, 2018. – 336 с.

Ланцман Г.А., Крень А.П. Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУГУНА

Рассмотрена возможность использования метода микроударного индентирования для оценки физико-механических характеристик чугуна с использованием прибора ИФМХ-Ч, разработанного в ИПФ НАН Беларуси, позволяющего разбраковать чугун по маркам (от СЧ10 до СЧ35; от ВЧ35 до ВЧ70), а также определить твердость по Бринеллю, модуль упругости и предел прочности непосредственно на изделиях без необходимости изготовления специальных образцов-свидетелей.

Механические характеристики чугуна регламентируются соответствующими стандартами. Для СЧ – это ГОСТ 1412-85, для ВЧ – ГОСТ 7293-85. Согласно данным стандартам марка определяется в первую очередь значением предела прочности σ при растяжении. В настоящее время в 100 % случаев для определения σ на предприятиях используют разрушающие методы контроля – с помощью разрывных машин. Это долго, неудобно и дорогостояще. В тоже время применение портативных динамических твердомеров является неоправданным, поскольку может приводить к большим погрешностям измерений (до 100 единиц Бринелля). Эти погрешности будут вызваны влиянием на процесс удара модуля упругости E_y (практически не зависит от структуры металлической основы, в отличие от твердости, и определяется в основном графитной составляющей), что не учитывается в используемых в настоящее время приборах неразрушающего контроля является установленная и многократно проверенная связь между прочностью, модулем упругости и твердостью:

$$\sigma = k \cdot E_y \cdot HB, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида чугуна: для серого $k \approx 1,15$, для высокопрочного $k \approx 1,62$.

В настоящей работе была изучена возможность применения метода динамического индентирования (МДИ) и прибора ИФМХ-Ч (рис. 1), реализующего данный метод для определения физико-механических характеристик чугуна.

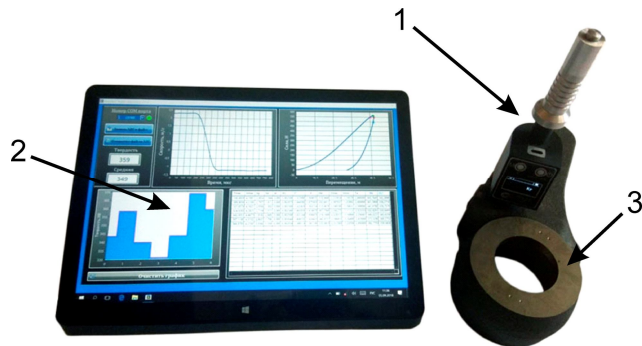


Рис. 1 – Внешний вид прибора для контроля характеристик чугуна:

1 – датчик-твердомер ТПЦ-7, 2 – электронный блок, 3 – образец

Прибор представляет собой датчик-твердомер и электронный блок (связан с датчиком беспроводной связью), который обрабатывает дополнительную информацию для установления физико-механических характеристик чугуна.

Сущность МДИ заключается в нанесении однократного микроудара с фиксированной предупредительной энергией, определяющейся массой индентора m и предупредительной скоростью V_n .

Отличительной особенностью метода является возможность регистрации всего процесса нагружения (рис. 2) в виде диаграмм «контактное усилие P – перемещение h », а также зависимостей $P = f(t)$, $h = f(t)$, $V = f(t)$ в широком диапазоне изменения сил и перемещений.

Регистрация параметров, указанных на рис. 2, позволяет использовать положения разработанного ИПФ НАН Беларуси государственного стандарта СТБ 2495-2017 «Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования» для расчета модуля упругости материала E_y , а также точных значений твердости НВ по данным ударного контакта. Это в корне отличает метод и оборудование от существующих обычных динамических твердомеров, которые регистрируют только отношение скорости отскока индентора V_o к скорости подлета V_n .

Если проанализировать результаты, полученные с помощью прибора ИФМХ-Ч, то можно утверждать, что для проведенных испытаний погрешность измерения НВ не превысила 15 единиц (в диапазоне 90–450 НВ), а предела прочности (для образцов, по которым имелись сведения) составила не более 5% (в диапазоне 100–900 МПа). При промышленном применении контроль может проводиться в отдельных важных точках изделия. Очевиден тот факт, что прибор может

помочь значительно сократить объем разрушающих испытаний на производстве.

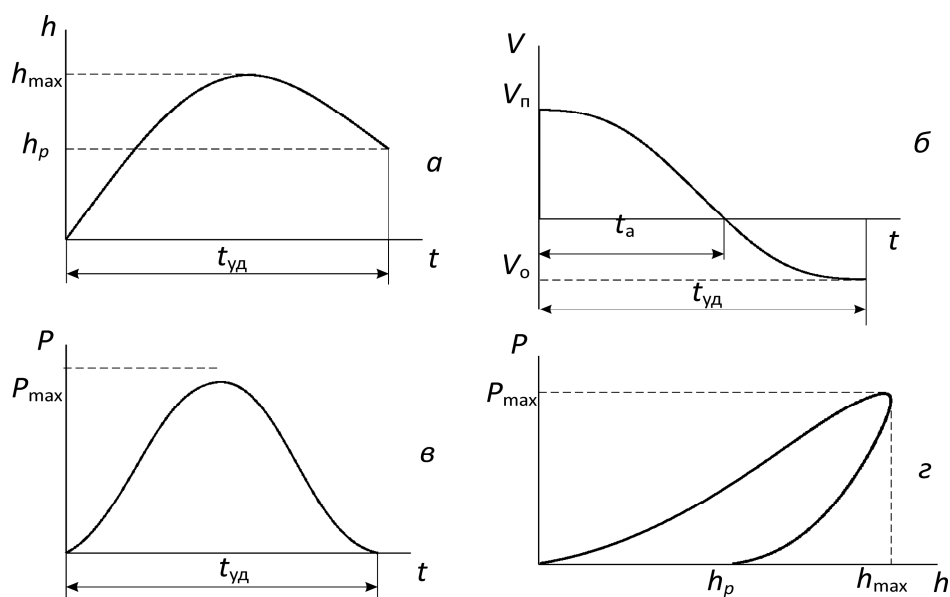


Рис. 2 – Характерные зависимости ударного процесса:

а, б, в – зависимости глубины внедрения индентора, скорости и контактного усилия от времени, *г* – диаграмма динамического индентирования

Лебедев В.Г., Фроленкова О.В. Одесский
национальный политехнический университет,
Одесса, Украина

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПЫЛЕННОГО ТЕРМОБАРЬЕРНОГО СЛОЯ $ZrO_2+Y_2O_3$ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЭЛЬБОРОВЫМИ КРУГАМИ

При шлифовании термобарьерных покрытий возникают следующие задачи:

1. Обеспечение на шлифуемой поверхности температуры шлифования ниже $1200\text{ }^\circ\text{C}$ для предупреждения спекания слоя
2. Обеспечение минимальных остаточных напряжений на границе термобарьерный слой-подложка для предотвращения отслаивания термобарьерного слоя от подложки
3. Обеспечение минимальных остаточных напряжений на границе подложка – материал детали для предупреждения отслаивания подложки от материала детали.

4. Обеспечение шероховатости поверхности порядка $Ra\ 0,16$.

Для достижения заданных целей было проведено аналитическое и экспериментальное исследование процесса шлифования многослойного теплозащитного покрытия $ZrO_2Y_2O_3$ на металлической подложке кругами из эльбора. В настоящих исследованиях, для проведения экспериментов была выбрана подложка Ni-Cr-Al-Y-Si. Проведенные исследования показали, что тепловое поле контактной температуры, направленное вглубь детали значительно, ослабевает и на нижней границе напыленного слоя и на верхней границе подложки величина температуры несколько выше температуры окружающей среды.

Определение остаточных напряжений в подложке, показало, что они достигают незначительной величины вследствие низкой температуры, до которой нагревается подложка (тепловое поле, проходя через стабилизированный оксидом иттрия, оксид циркония в основном поглощает тепло, в результате чего температура подложки не может вызвать значительных напряжений).

При увеличении глубины шлифования возрастает толщина стружки, снимаемая отдельным зерном, кроме того, количество тепловых импульсов также увеличивается. Все это приводит к значительному росту температуры. Остаточные напряжения также растут, однако в подложке они не значительны по причине, которая была указана выше. Все это дает основания утверждать, что напыленный на подложку слой циркониевой керамики можно шлифовать с высокими скоростями шлифовального круга (в нашем случае 50 м/с) и со значительными глубинами шлифования без опасения отслаивания напыленного слоя. Однако при этом контактные температуры достигают величин больше 1200 °С, что может привести к спеканию поверхностного слоя. Поэтому более напряженные режимы шлифования, чем указанные выше, применять не следует. Полученные зависимости показаны на рис. 1.

Результаты исследований шероховатости показали, что большое влияние на шероховатость оказывает зернистость шлифовального круга. Так, изменение зернистости шлифовального круга с 120/100 до 250/160 увеличивает шероховатость на 2–3 разряда, т.е. практически снижает ее на класс. Это объясняется тем, что при увеличении зернистости круга растут радиусы закругления зерен, возрастают силы, действующие на зерно, и увеличивается величина углубления зерна в материал. Режимы обработки также оказывают большое влияние на величину шероховатости (рис. 2).

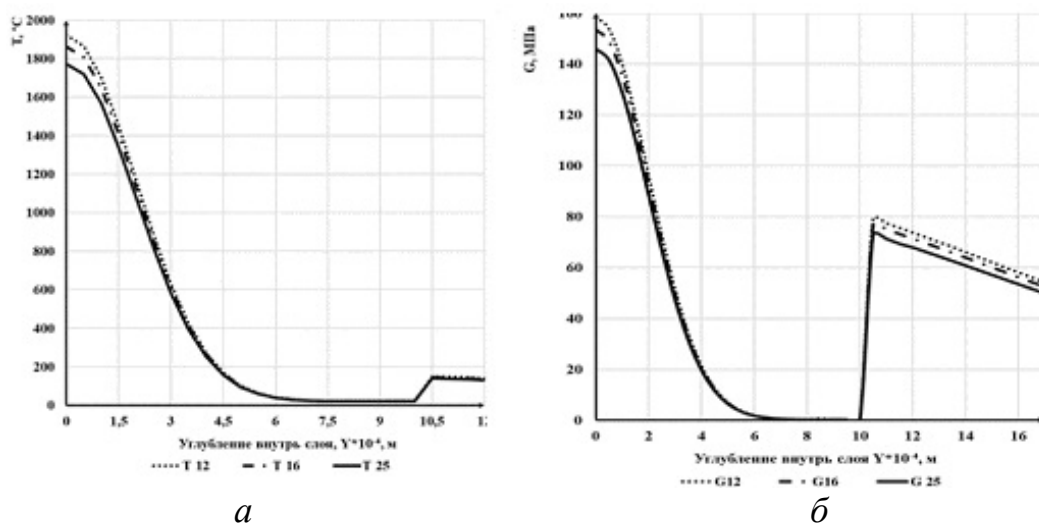


Рис. 1 – Зависимость величины контактных температур (а) и вглубь (б) термобарьерного слоя и закономерность изменения величины остаточных напряжений и металлической подложки при шлифовании кругами ЛО 125/100 С10 100%, ЛО 160/125 С10 100%, Режимы $V_{\text{кр}} = 50/25/160 \text{ м/с}$, $S = 0,002 \text{ м/ход}$

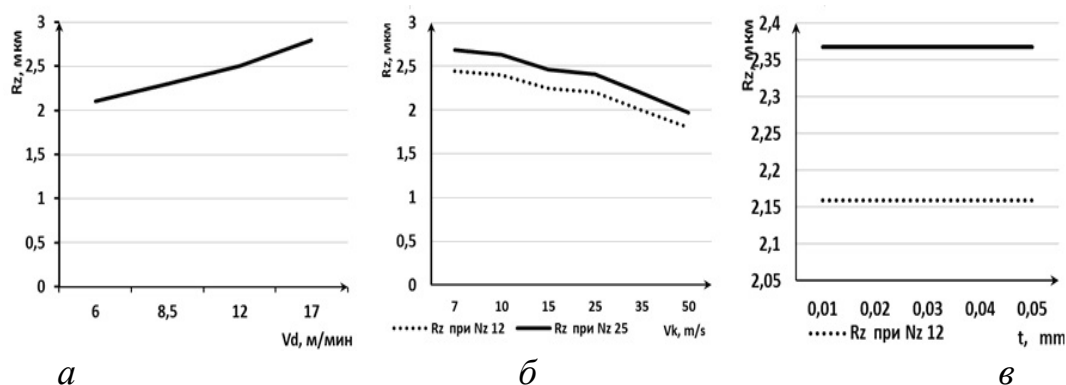


Рис. 2 – Зависимости величины шероховатости поверхности от скорости детали (а), скорости круга при разных зернистостях (б) и от глубины шлифования (в)

Наиболее приемлемой, как видно из приведенного материала, является скорость круга 30–35 м/с, при которой наблюдаются умеренные температуры, умеренные остаточные напряжения и достаточно низкая шероховатость поверхности.

Литература

1. Lebedev, V. Experimental Study of the Process of Borazon Grinding of Thermal Barrier Coating of ZrO / V. Lebedev, V. Tonkonogyi, V. Vaysman et all. // Advanced Manufacturing Processes. – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 177–185.

*Лещинский Л.К., Иванов В.П. Приазовский
государственный технический университет
Возьянов Е.И. ЧАО «МК «Азовсталь», Мариуполь, Украина*

СНИЖЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ИЗНОСА НАПЛАВЛЕННЫХ РОЛИКОВ МНЛЗ

Неравномерность износа роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) вызвана несоответствием характера изменения нагрузки по длине бочки распределению свойств поверхностного слоя. Наибольшему износу подвергаются участки бочки, контактирующие с краями сляба по ширине, и средняя часть бочки, что связано с ее перегревом. В то же время, менее интенсивен износ крайних участков бочки. Снизить неравномерность износа можно путем изменения по длине бочки структуры и свойств наплавленного поверхностного слоя. С этой целью при изготовлении ролика путем наплавки изменяют содержание легирующего элемента, за счет чего обеспечивают необходимое распределение свойств по длине бочки. Известно, что необходимым сопротивлением коррозионно-механическому износу и термоусталостному разрушению в условиях эксплуатации роликов МНЛЗ отличается наплавленный слой типа X17M1, содержащий 0,12-0,15% углерода. Ранее проведенных исследований работоспособность роликов, наплавленных этим материалом, значительно повышается в случае применения отпуска при температуре 700 °С. Вместе с тем, проведение такого высокого отпуска может вызвать прогиб ролика, привести к окислению посадочных мест подшипников. Снизить температуру отпуска позволяет легирование наплавленного металла никелем. Более того, за счет изменения содержания никеля в наплавленном слое по длине бочки можно обеспечить соответствующее распределение свойств по длине бочки. Целесообразно при изготовлении роликов МНЛЗ увеличивать в наплавленном слое содержание никеля от минимального значения на краю бочки с повышением по предлагаемому закону до максимального в середине бочки, в то время как при дальнейшем наплавке от середины до другого края бочки симметрично уменьшать содержание никеля, в соответствии с изменением массовой скорости подачи электрода, содержащего никель, при сохранении постоянным значения суммарной массовой скорости.

Изготовление ролика машины непрерывного литья заготовок диаметром 300 мм и длиной бочки 2000 мм (материал – сталь 25X1M1Ф) производили путем наплавки двумя электродами диаметром 3,6 мм под флюсом АН-26. В процессе дуговой наплавки осуществляли подачу в общую ванну двух электродных проволок: проволоки ПП-Нп-05X17M1 (0,05% С, 17,0% Cr, 1,2% Мо, 0,9% Mn, 0,7% Si) и проволоки, содержащей никель, ПП-Нп-05X17M1Н5 (0,04% С, 16,8% Cr, 1,3% Мо, 0,9% Mn, 0,5% Si, 5,6% Ni). Режим наплавки: ток постоянный обратной полярности 500–550 А, напряжение 30–32 В, скорость наплавки 12 м/ч, суммарная массовая скорость подачи двух проволок 6,5 г/с.

В процессе наплавки использовали программируемую систему управления каждым из приводов подачи электродных проволок, что позволило, задавая закон изменения содержания никеля в наплавленном слое по длине бочки, сохранять постоянной суммарную объемную скорость подачи проволоки. Необходимое распределение свойств наплавленного металла по длине бочки обеспечивали путем соответствующего изменения содержания никеля по предлагаемому закону. Так, на расстоянии 250 мм от края (1/8 длины бочки ролика) при соотношении скоростей подачи электродов без никеля и с содержанием никеля 0,35/0,65 от суммарной скорости содержание никеля имело минимальное значение 1,96%. После этого, содержание никеля дискретно повышалось до 3,36% при более высоком значении скорости подачи электрода, содержащего никель, и соотношении скоростей подачи (0,6/0,4). Далее содержание никеля монотонно возрастает до максимального значения – 5,6% в середине длины бочки (1000 мм от края). При этом значение массовой скорости подачи электрода, содержащего никель, равно значению суммарной скорости подачи – 6,5 г/с, а электрод без никеля не подавался. В целом, распределение содержания никеля по длине бочки имело симметричный характер.

Такое изменение химического состава наплавленного металла по длине бочки ролика обеспечило значительно более равномерное сопротивление износу. Это позволило повысить работоспособность ролика за счет снижения интенсивности износа и растрескивания. При эксплуатации наплавленного по предлагаемой технологии ролика машины непрерывного литья заготовок, благодаря значительному снижению неравномерности износа бочки, стойкость ролика повысилась на 1400 плавов.

Лецинский Л.К., Матвиенко В.Н., Степнов К.К.
Приазовский государственный технический университет,
Возьянов Е.И. ПАО «МК Азовсталь»,
Карауланов О.В. ООО «МЕТИНВЕСТ-МРМЗ»,
Мариуполь, Украина

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ И РОЛИКОВ МНЛЗ

Основной задачей при разработке и совершенствовании технологии наплавки прокатных валков и роликов машин непрерывного литья заготовок, являются получение требуемого состава металла, необходимого качества формирования швов (отсутствие дефектов), обеспечение требуемых функциональных свойств наплавленного рабочего слоя. Одна из важнейших его характеристик – сопротивление распространению трещины. Здесь большое значение имеет направление её прохождения по отношению к межслойной границе, которая играет роль барьера на пути распространения трещины не только между разнородными, но и однородными слоями. Кроме того, следует учитывать необходимость свести к минимуму уменьшение сопротивления растрескиванию в зонах перекрытия смежных валиков, где повторный нагрев приводит к росту зерна, выпадению карбидной фазы по границам зёрен, снижению механических свойств. Возможность торможения трещины зависит от эпюры распределения напряжений в поверхностном слое валика (скачка напряжений на границе наплавленных слоёв). Для снижения уровня напряженного состояния и ограничения длины поверхностной трещины целесообразно совершенствование технологии наплавки валков горячей прокатки роликов МНЛЗ надвухнаправленного снижения напряжений при формировании наплавленного слоя из отдельных валиков без перекрытия ширины одиночного валика уменьшают от краёв к середине длины бочки, а величину зазора напротив – увеличивают к середине бочки; вместе с тем, к дополнительной разгрузке напряжений в поверхностном слое ролика приводит изменение наклона валиков в разные стороны от середины к краю бочки; в свою очередь, ширину валика вдоль образующей ограничивают критической длиной поверхностной трещины, пересекающей валик в диаметральной плоскости.

2 – наплавка валиков, траектория укладки которых отклоняется от прямо-линейной и обеспечивает ориентацию валиков под углом к образующей; за счёт изменений условий нагрева поверхностного слоя валка сварочным источником тепла, который перемещается по сложной траектории, снижается перегрев наплавленного слоя и уровень напряжений; при ориентации вектора наплавки под углом к образующей снижаются напряжения, действующие на металл шва и зон перекрытия; кроме того, с отклонением вектора скорости наплавки изменяется кристаллическое строение литого металла, при этом границы смежных участков могут являться препятствием распространению трещины, приводить к искривлению и ветвлению траектории с образованием мелких вторичных трещин, сопровождаясь их пересечением и замедлением.

Лойко В.А., Ивашко В.С. Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

НАНЕСЕНИЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОТВЕТСТВЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ АВТОМОБИЛЕЙ

Вакуумно-плазменные технологии нанесения покрытия позволяют наносить в одном технологическом цикле как твердые износостойкие слои на основе твердых карбидов и нитридов переходных металлов IVa-VIa групп Периодической системы и их композиций, так и тонкие слои твердых смазок, улучшающие эксплуатационные характеристики пар трения [1]. Эти технологии перспективны для упрочнения и восстановления ответственных деталей автотракторной техники, изготовленных из качественных конструкционных углеродистых или легированных цементированных сталей с твердостью 42–56 HRC, следовательно, предельная температура поверхности детали не должна превышать критическую температуру фазовых превращений, приводящих к потере поверхностной твердости или короблению ($\sim 200\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от материала) происходящих на поверхности инструмента. Процесс ионно-плазменной обработки можно условно разделить на два этапа: ионную очистку бомбардировкой ионами металла и собственно нанесение покрытия.

Первый этап характеризуется разрушением поверхностных адсорбированных и окисных пленок, эффективность процесса определяется энергией ионов (зависящей от начальной энергии, заряда иона и его массы), временем воздействия, количеством и массой нейтральных частиц, углом атаки ионного потока по отношению к бомбардируемой поверхности, скоростью относительного перемещения бомбардируемой поверхности и потока. На втором этапе реализуется непосредственный (физический) контакт ионного потока с поверхностью, передача кинетической энергии и осаждение частиц ионной и капельной компоненты с размерами от 0,1 до 20 мкм, содержание которой зависит от теплофизических характеристик испаряемого металла и технологических режимов. Микрокапельные частицы приносят на поверхность энергию кристаллизации, что приводит к неконтролируемому росту температуры детали, поэтому следует исключить или свести к минимуму участие капель материала катода в бомбардировке поверхности при очистке и осаждении покрытия технологически, либо использованием специальных конструкций испарителей или сепараторов. При очистке и осаждении деталей автомобилей на первом этапе целесообразно уменьшать продолжительность очистки ионами металла, компенсируя более «мягкой» и контролируемой обработкой потоками различной плотности ионов нейтрального газа Ar [1] с энергией 0,1–4,0 кэВ с использованием источников типа «Радикал» или «Аида».

На стадии нанесения покрытия характер взаимодействия потока заряженных частиц с поверхностью и протекание физико-химических процессов изменяется. При этом существенно влияние относительной атомной массы ионов и атомов твердого тела, теплофизических констант материала восстанавливаемой детали, дозы ионов, угла падения потока, заряда ионов и от энергии ионов. Ионизация исходных компонентов обеспечивает высокую эффективность протекания химических реакций при достаточно низкой температуре поверхности конденсации, свойства покрытий определяются при этом в значительной степени параметрами ионного компонента плазмы. Проведенные исследования показали, что в диапазоне энергий $8 \cdot 10^{-2} < E < 10^{+2}$ эВ реализуется термическая активация поверхности, в диапазоне $10^{-1} > E > 10^{+3}$ эВ, наблюдается десорбция атомов примесей. наблюдается два одновременно протекающих на поверхности твердого тела и конкурирующих между собой физико-химических процессов распыление и конденсация [3].

Характер изменения температуры в процессе осаждения покрытия определяется начальной температурой, массой и поверхностью образца и условиями конденсации. При этом температура может как уменьшаться, так и возрастать, ее изменение во времени носит монотонный характер, может быть легко проконтролирована и скорректирована с учетом предельно допустимой температуры детали. Вероятность формирования слоя химического соединения термодинамически зависит от баланса энергии на поверхности, в том числе от температуры детали в процессе нанесения покрытий. Поэтому целесообразно оценить возможность получения нитридов при низких температурах 200–300 °С. Энергетические границы образования тугоплавкого покрытия для систем $Ti + N_2$, $Cr + N_2$ и $Mo + N_2$, которые равны соответственно 150, 159 и 187 эВ. Результаты этих вычислений хорошо согласуются с экспериментальными значениями, равными 150, 160 и 190 эВ [3].

Следовательно, для исключения недопустимого снижения твердости основы деталей автомобилей при вакуумно-плазменном упрочнении или восстановлении поверхностей на стадии ионной очистки следует свести к минимуму обработку ионами металла катода, использовать современные конструкции электродуговых испарителей и системы сепарации нейтральных частиц. Процесс нанесения вакуумно-плазменных покрытий из химических соединений титана, хрома и молибдена на детали автомобилей при восстановлении или упрочнении поверхностей целесообразно проводить в диапазоне температур < 200–300 °С.

Литература

1. Лойко, В.А. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве / В.А. Лойко, В.И. Ивашко, С.А. Клименко и др. – Мн. : Издание УО «БГАТУ», 2007. – 191 с.
2. Лойко, В.А. Структурные и физико-механические характеристики вакуумно-плазменных покрытий на основе карбидов и нитридов титана / В.А. Лойко, В.С. Ивашко, Л.В. Маркова // Изобретатель. – 2017. – №5–6 (209–210). – С. 34–38.
3. Аксенов, И.И. Об условиях протекания химических реакций при конденсации потоков металлической плазмы / И.И. Аксенов, В.Г. Брень, В.Г. Падалка и др. // Журнал тех. физики. – 1978. – № 6. – С. 1165–1176.

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО СПРАЦЮВАННЯ

Напилення та наплавлення – розповсюджені способи відновлення спрацьованих і ушкоджених деталей при ремонті машин. Покриття при відновленні деталей широко застосовуються для нарощування спрацьованих поверхонь. При відновленні сталевих деталей застосовують наплавлення, газотермічне напилення покриттів, у т. ч., газопорошкове наплавлення та електродугову металізацію. При виборі методу нанесення покриття враховуються габарити, форма та маса деталі, матеріал деталі, величина спрацювання та умови її експлуатації. При нанесенні покриття до 4 мм на сторону застосовуються методи газополуменевого напилення або газопорошкового наплавлення, а при товщині покриття до 6 мм – метод електродугової металізації. Електродугове наплавлення застосовується при спрацюванні деталі на сторону від 0,1 мм (посадочні місця під шків, колеса) до 20 мм (зуби ковшів екскаваторів, держак дробарок) існого напавленого шару при відновленні деталей першорядне значення мають правильний вибір матеріалу покриття і дотримання технології його нанесення. При виборі матеріалу покриття враховується характер дефекту, що усувається, марка сталі, з якої виготовлена деталь і вимоги до напавленого шару номінальних деталей, що працюють в умовах абразивного спрацювання, вибирають плавкі електроди для напавлення марок Т-620, Т-590. Для ручного дугового напавлення неплавким електродом деталей застосовуються сормайтіві стрижні ПР-С1, ПР-С27 діаметром 8 мм. Покриття мають високу зносостійкість і твердість не менше 50 HRC. Термін служби відновлених штампів преса силікатної цегли збільшується в 2–3 рази. Для газополуменевого напилення та газопорошкового напавлення деталей, що працюють в умовах абразивного спрацювання, рекомендується порошкова суміш ПС-12НВК-01 (нікелевий самофлюсівний сплав + карбід вольфраму). Твердість отриманих покриттів 57–64 HRC. Цей матеріал застосовується для зміцнення та від-

новлення шнеків, лопаток і шкребків змішувачів, молотків дробарок, напрямних автоматів для отримання склотари, деталей обладнання цегельних заводів.

Для нанесення покриттів методом електродугової металізації вибираються дроти марок Нп-Г13, Нп-40Х13 діаметром 1,8 мм. З метою поліпшення зчеплення основного покриття з основою наноситься підшар покриття шляхом розпилення дроту марки ФМІ-2. Твердість покриття – 45–52 HRC. Термін служби відновлених пластин коробок преса силікатної цегли при цьому збільшується в 2,5 рази.

*Письменний О.С., Прокоф'єв О.С., Римар С.В.,
Пантелеймонов Є.О., Губатюк Р.С.* Інститут
електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
Київ, Україна

СТИКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ-ПАЯННЯ ТРУБ З ПРИКЛАДАННЯМ ТИСКУ І ЕМАЛЬОВАНИМ І СКЛЯНИМ ВНУТРІШНІМ ПОКРИТТЯМ

Відомо, що одним із способів підвищення ресурсу трубопроводів є захист їх внутрішньої поверхні від негативного впливу речовин, яка по них транспортується. З цією метою при будівництві трубопроводів застосовують труби із внутрішнім захисним покриттям. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено низькотемпературний спосіб зварювання стикових з'єднань сталевих труб із внутрішнім емальованим і скляним покриттям, без його ушкодження. В процесі зварювання забезпечується формування якісного рівномірного зварного з'єднання без розплавлення основного металу базується на розробленому в Інституті способу зварювання-паяння під тиском [1]. Спосіб ґрунтується на запропонованому індукційно-пресовому зварюванні із застосуванням активуючих речовин в зоні з'єднання і подальшої її пластичної деформації з прикладанням тиску [2–5]. Нагрівання зони шва відбувається безконтактним індукційним шляхом. Активуючі речовини в зоні шва при їх розплавленні активують поверхні основного металу, що з'єднуються, частково легуючи їх і захищаючи рідкою фазою зону зварювання від

атмосферних впливів і дозволяє знизити температуру проведення процесу зварювання. При цьому формування і утворення самого зварного з'єднання відбувається в твердій фазі, без розплавлення основного металу і захисного покриття. Температура проведення процесу визначається температурою плавлення активуючих речовин, яка нижча за температуру плавлення основного металу. Застосування тиску і подальша пластична деформація зварного з'єднання призводить до зустрічних дифузійних процесів металу в зоні шва, збільшує площу з'єднувальних поверхонь в шві і сприяє видаленню з зони шва продуктів активації у вигляді тонкого рідкого прошарку, що омиває крайки основного металу, і є небажаними компонентами в сформованому шві. З'єднання утворюється очищеним основним металом, що знаходиться в твердому стані і має температуру трохи вище точки A_{C3} діаграми стану сплавів залізо-вуглець.

В результаті стикового зварювання-паяння труб з прикладанням тиску і з контрольованою деформацією крайок у місці зварного стику формується невелика випуклість на зовнішній поверхні труб, з відсутністю ґрата на внутрішній поверхні і без ушкодження захисного покриття на внутрішній поверхні. Сформоване з'єднання не потребує подальшої механічної обробки.

Розроблений спосіб може виконуватися також при важко зварювальних, або різнорідних металів труб.

Розроблений спосіб зварювання-паяння з прикладанням тиску із контрольованою деформацією крайок об'єднує у собі позитивні сторони пресового зварювання тиском і паяння, та дозволяє отримувати міцне зварне стикове з'єднання сталевих труб без ушкодження внутрішнього захисного покриття, яке в процесі зварювання перебуває в пластичному стані.

Розроблене в Інституті дослідне устаткування для зварювання-паяння труб дозволяє виконувати зварні з'єднання трубопроводів в цехових і польових умовах в тому числі і для труб із внутрішнім емальованим і скляним покриттям.

На рис. 1 наведено приклад зварно-паяного стикового з'єднання труб із внутрішнім емальованим покриттям.

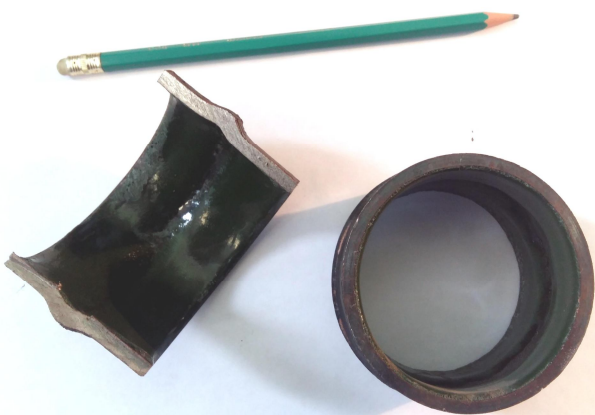


Рис. 1 – Зварно-паяне стикове з'єднання труб із внутрішнім емальованим покриттям

Перевагами способу зварювання-паяння з прикладанням тиску є:

- формування рівномірного з'єднання без розплавлення основного металу з'єднувальних крайок;
- збереження первинної структури металу без небажаних фазових перетворень;
- чистота поверхонь зварювання і їх захист від атмосферних впливів;
- контрольована деформація зварювальних крайок;
- відсутність необхідності забезпечення капілярних зазорів між крайками виробів;
- з'єднання сталевих труб без ушкодження внутрішнього емальованого і скляного захисного покриття;
- висока виробнича потужність розробленого способу зварювання-паяння з прикладанням тиску і можливість автоматизації процесу.

Література

1. ДСТУ 3761.2-98. Зварювання та споріднені процеси. Частина 2. Процеси зварювання та паяння. Терміни та визначення (ISO 857:1990). – К. : Держспоживстандарт України, 1999. – 64 с.

2. Pis'menny, A.S. High-frequency welding of metals / A.S. Pis'menny; ed. B.E. Paton. – Amsterdam : Harwood Acad. Publ., 1997. – 150 p.

3. Письменный, А.С. Высокочастотная сварка металлических изделий / А.С. Письменный; под. ред. Б.Е. Патона. – К. : Ин-т электросварки им. Е.О. Патона, 2008. – 178 с.

4. Лебедев, В.К. Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов / В.К. Лебедев, В.Д. Табелев, А.С. Письменный // Автоматическая сварка. – 1983. – № 9. – С. 25–27.

5. Письменный, А.С. Прессовая сварка труб с применением активирующих веществ / А.С. Письменный, О.С. Прокофьев // Автоматическая сварка. – 2002. – № 7. – С. 22–27.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ОСНАСТКИ ПРЕСС-ФОРМ

Для обеспечения требуемой долговечности формообразующих элементов пресс-форм назначают допустимые предельные отклонения от номинальных сопрягаемых размеров знаков. Заданная точность обработки должна быть обеспечена на этапах технологического процесса различными методами обработки.

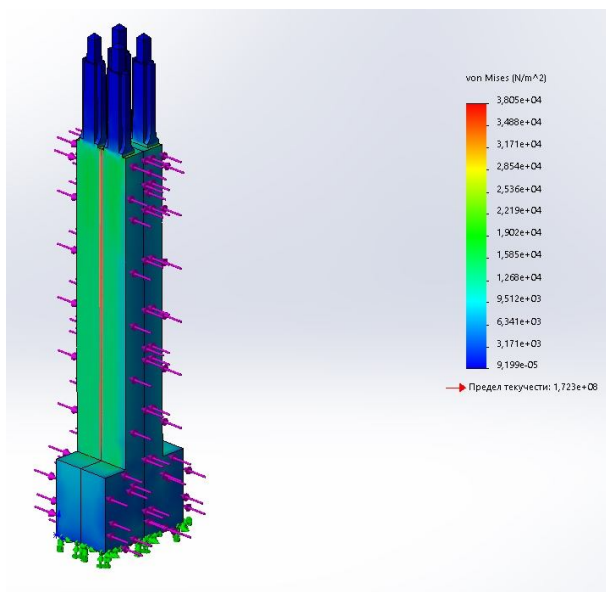


Рис. 1 – Модель формирования контактной деформации при сборке элементов формообразующей оснастки

При сборке формообразующих деталей в цельный элемент – гребенка, возникают усилия, которые формируют контактную деформацию каждого знака (рис. 1). Контактная деформация знака функционально формируется параметрами качества поверхностного слоя.

В ряде случаев выходной параметр удается представить в виде трех независимых составляющих:

$$z_j(t) = \xi_0 f_1[g_1(t), g_2(t), \dots, g_i(t)] + h(t) + \zeta(t)$$

где ξ_0 – случайная величина, оценивающая начальное качество; f_1 – неслучайная функция возмущений; $h(t)$ и $\zeta(t)$ – случайные функции, оценивающие соответственно влияние медленно протекающих процессов и внезапных случайных флуктуаций параметра.

В ряде случаев, когда отказ в форме выхода параметра состояния за определенную границу (выброс) не приводит к значительным отрицательным последствиям, регламентироваться может параметр потока отказов μ . При известной плотности совместного распределения параметра состояния $z(t)$ и скорости его изменения во

времени $v(t)$ усредненный параметр потока отказов, определяющий число выбросов за границы в единицу времени:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^{\infty} \phi(R_2, v/t) v dv + \int_{-\infty}^0 \phi(R_1, v/t) v dv \right] dt.$$

В общем случае работоспособность объекта, качество его функционирования определяется не одним, а совокупностью s выходных параметров состояния z_1, z_2, \dots, z_i , которые можно считать компонентами некоторого вектора Z . Тогда пространство состояний некоторой граничной поверхностью ω можно разделить на две области: область Ω работоспособных состояний и область отказов. Безотказность в этом случае определяется как вероятность того, что за время функционирования системы T параметры состояния z_i не выходят за соответствующие границы R_{i1} и R_{i2} :

$$P(T) = P\{Z \in \Omega / t \leq T\} = P\{R_{11} < z_1 < R_{12}, R_{21} < z_2 < R_{22}, \dots, R_{s1} < z_s < R_{s2} / t \leq T\}$$

Наиболее общий случай, когда исходное качество всех объектов неоднородно, условия эксплуатации переменны, средняя скорость процесса зависит от времени функционирования. Неоднородность качества может быть вызвана рассеянием начальных размеров, а так же различием физических свойств у контактирующих поверхностей, приводящих к варьированию средней скорости процесса каждой реализации [1].

Тогда модель скорости процесса принимает вид:

$$k(t) = m_k(t) + k^0(t) = m_k(t) + a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega t)$$

где a_0 – центрированная случайная величина, учитывающая исходное качество объекта.

Таким образом, решение задачи оптимального распределения величины допуска на эксплуатационные звенья сборочной размерной цепи узла и назначение обоснованных требований по качеству поверхности для обеспечения требуемой надежности возможно при условии определения весовых коэффициентов, устанавливающих значимость влияния того или другого эксплуатационного свойства в элементарном прототипе. Назначение весовых коэффициентов при условии максимальной вероятности безотказной работы контактирующей пары является необходимым условием для разработки автоматизированной подсистемы технологического обеспечения надежности машины на этапах анализа размерных связей при конструкторско-технологической подготовке производства.

Литература

1. Суслов, А.Г. Научно-технологическая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / А.Г. Суслов, О.Н. Федонин, Е.А. Польский // Научно-технологические технологии в машиностроении. – 2016. – №5 (59). – С 34–42.

Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Аксьом П.А.
Національний транспортний університет, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ СТАЛІ ПРИ МАГНІТНИХ ПЕРЕТВОРЕННЯХ

Такі дослідження доцільно проводити з використанням рентгеновського дифрактометра Rigaku Ultima IV (рис. 1). Технічні характеристики використовуваного в дифрактометрі джерела випромінювання, гоніометра, оптичної системи та детектора наведені в табл. 1.



Рис. 1 – Рентгеновський дифрактометр Rigaku Ultima IV

Прилад дозволяє визначати: кількісний та якісний фазовий склад досліджуваного матеріалу, період кристалічної ґратки, розмір областей когерентного розсіяння, ступінь деформації кристалічної ґратки, величину залишкових макронапружень методом $\sin^2\psi$, кристаллографічну орієнтацію кристалів, ступінь кристалічності.

Метод аналізу – рентгеноструктурний фазовий аналіз. Рекомендується дослідження зразків проводити у мідному випромінюванні ($\text{Cu}_{K\alpha} = 0,15418 \text{ нм}$). Напруга – 30 кВ; сила струму – 30 мА; ширина щілини, яка обмежує рентгеновський промінь – 10 мм. Для дослідження використовується схема фокусування за Брегом–Брентано. Умови досліджень: досліджений інтервал кутів $2\Theta = 25\text{--}140^\circ$, крок зйомки – $0,04^\circ$, час витримки у точці – 2 с; тривалість зйомки одного зразка – 90 хв.

Аналіз отриманих рентгеновських спектрів та кількісного і якісного фазового аналізу проводиться з використанням програмного

забезпечення PDXL, міжнародної бази даних дифракції ICDD (PDF–2) та відкритої бази кристалографічних даних COD.

Таблиця 1 – Характеристики рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV

Джерело випромінювання	Максимальна потужність	3 кВт
	Напруга на трубці	20 – 60 кВ
	Струм трубки	2 – 60 мА
	Матеріал анода	Cu або Co
	Розмір фокуса	0,4 x 12 мм
Гоніометр	Метод сканування	Θ_s / Θ_d зв'язані або Θ_s, Θ_d незалежні
	Радіус гоніометра	285 мм
	Діапазон кутів сканування 2Θ	від -3 до 162° (максимум)
	Мінімальний крок	$0,0001^\circ$
Оптична система	Щілини на вихідний пучок	Фіксовані або автоматично змінювані
	Щілини на дифрагований пучок	
	Приймальні щілини	
	Юстування оптичної системи	Автоматичне юстування трубки по висоті, гоніометра, оптики і детектора
	Монохроматор	Двохпозиційний графітовий кристал–монохроматор Cu–випромінювання
Детектор	Детектор	Сцинтиляційний лічильник

За теорією феромагнетизму між структурою металу і магнітними властивостями існує тісний зв'язок, який проявляється у магнітних характеристиках металу. Для магнітного структурного аналізу найбільш цікавими є коерцитивна сила, залишкова намагніченість, намагніченість насичення та індуктивна дія (магнітна індукція). Для такого аналізу звичайно достатньо визначити першу та останню характеристики.

Коерцитивну силу доцільно досліджувати за допомогою стаціонарного автоматичного коерцитиметра ИКС8–3 (рис. 2), а магнітну індукцію – переносним мілітеслометром ТПУ (рис. 3).



Рис. 2 – Стационарний автоматичний коерцитиметр ИКС8-3



Рис. 3 – Переносний мілітеслометр ТПУ

Досліджено вплив холодного пластичного деформування (ХПД) на зміну парамагнітних властивостей аустенітних сталей [1]. Установлено, що структурні перетворення парамагнітного стану у частково феромагнітний під дією ХПД сприяє підвищенню оброблюваності аустенітних сталей [2]. Досліджувались коерцитивна сила та магнітна індукція сталі 12Х15Г9НД, за допомогою коерцитиметра ИКС8-3 та мілітеслометра ТПУ[1]. Результати дос

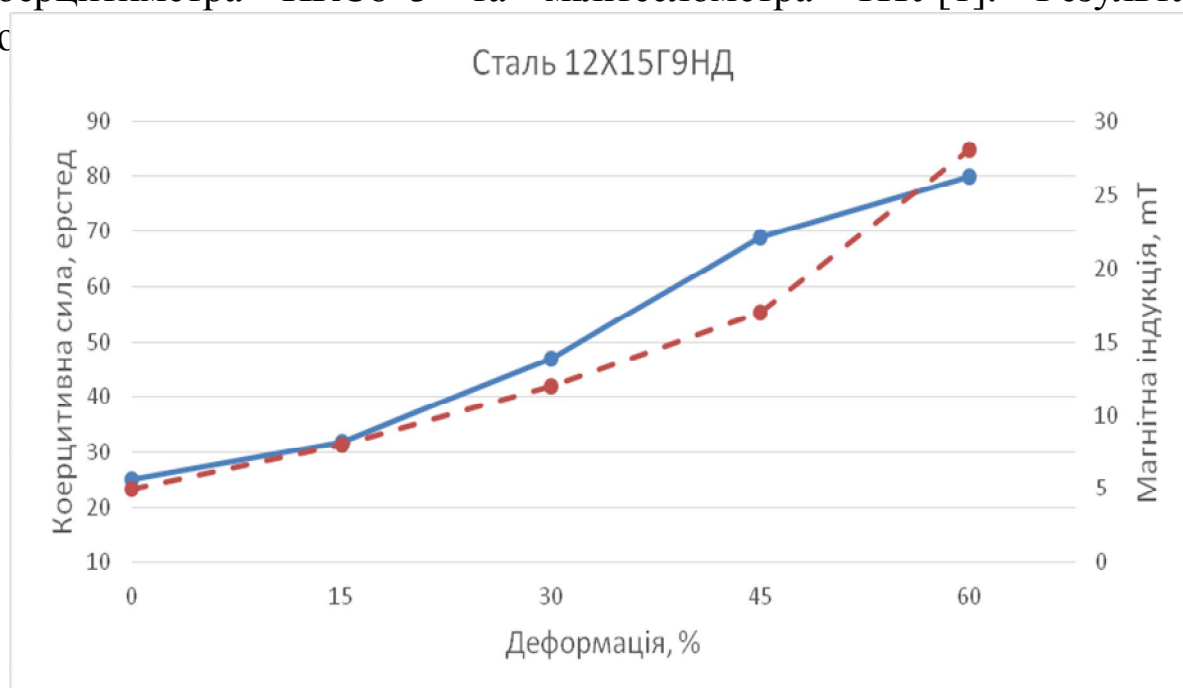


Рис. 4 – Графік залежності зміни напруженості магнітного поля (суцільна лінія) та магнітної індукції (штрихова лінія) від ступеню деформації сталі 12Х15Г9НД

Таким чином, уперше установлена роль фазових структурних перетворень "аустеніт-мартенсит", ініційованих ХПД.

Література

1. Посвятенко, Е.К. Про природу впливу деформаційного зміцнення на оброблюваність аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Нац. транспорт. ун-ту : наук.-техн. зб. – К. : НТУ, 2019. – Серія «Технічні науки». Вип. 3 (45). – С. 113–121.

2. Посвятенко, Е.К. Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно-охолоджуючих рідин на фізико-механічні та технологічні властивості аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, Н.І. Посвятенко // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 172–178.

*Присяжнюк П.М., Шлапак Л.С., Андрусин Р.В.,
Семяник І.М., Трощук Л.Л.* Івано-Франківський
національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КРЕМНІЮ НА КРИСТАЛІЧНУ СТРУКТУРУ ТА ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ МАРГАНЦЕВОГО АУСТЕНІТУ

Марганцевий аустеніт у структурі покриттів, отриманих при зміцненні та (або) відновленні залишається основною фазою, яка забезпечує протидію ударному зношуванню за рахунок поглинання енергії удару на проходження серій субструктурних перетворень за механізмами мікродвійникування. При електродуговому нанесенні покриттів отримання аустенітної структури проводиться із використанням електродних матеріалів складу: Mn ~ 10–18%, C ~ 0,8–1,4%, Fe – решта. Це матеріали таких виробників як ESAB (Швеція) – ОК14MnNi, Wodon (Китай) – WD-256, Kobelco (Японія) – HF-11, Lastek (Бельгія) – Lastek 22 та ін. Спільною рисою для перерахованих електродних матеріалів є те, що у них обов'язково присутня домішка кремнію у кількості 0,3–0,8%. Відомо, що наявність кремнію в електродних матеріалах значно підвищує технологічність процесів зварювання та наплавлення, а також захисту металу шва. Однак, не відомим залишається вплив кремнію на кристалічну будову марганцевого аустеніту, характеристики якої в кінцевому підсумку визнача-

ють ударну зносостійкість поверхневого шару. Для встановлення впливу кремнію було застосовано моделювання ґраток аустеніту тригональної просторової групи у вигляді впорядкованих твердих розчинів трьох видів: Fe_{16}C , $\text{Fe}_{27}\text{C}_2\text{Mn}_5$ та $\text{Fe}_{27}\text{C}_2\text{Mn}_5\text{Si}_3$ (рис. 1). Розрахунок проводився із використанням програмного коду CASTEP, побудованого на теорії функціоналу електронної густини (DFT) із використанням узагальненого градієнтного наближення (GGA) у представленні Педью-Бурке-Ернзергофа (PBE). Зону Бріллюена розбивали на сітку k-точок $2 \times 2 \times 4$ за схемою Монхорста-Пака. Оптимізацію геометрії вважали завершеною при об'ємному напруженні $< 0,2$ ГПа та сил, що діють на атом $< 0,1$ eV/Å.

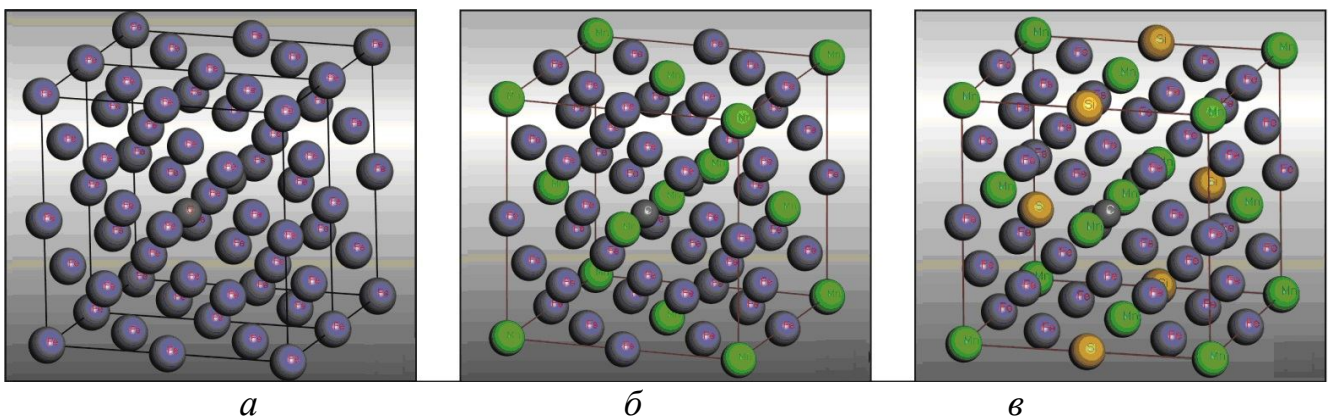


Рис. 1 – Моделі кристалічних ґраток аустеніту:
a – Fe_{16}C ; *б* – $\text{Fe}_{27}\text{C}_2\text{Mn}_5$; *в* – $\text{Fe}_{24}\text{C}_2\text{Mn}_5\text{Si}_3$

Результати порівняння розрахованих параметрів ґраток знаходяться у відповідності із літературними даними для чистого заліза 3.44 Å та для вуглецевого аустеніту 3.5519 Å [1] (табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри ґраток модельних структур аустеніту

Формула	Fe	Fe_{16}C	$\text{Fe}_{27}\text{C}_2\text{Mn}_5$	$\text{Fe}_{24}\text{C}_2\text{Mn}_5\text{Si}_3$
Параметр ґратки, Å	3,4523	3,5021	3,5187	3,5287

Розрахована густина станів на рівні Фермі показує, що при наявності кремнію розчиненого в аустеніті має місце зниження кількості електронів, яке є ознакою підвищення електрохімічної стабільності структури [2]. Це поряд із графітуючою дією кремнію робить марганцевий аустеніт більш стабільним у процесі наплавлення. Аналіз розрахованих пружних властивостей (об'ємного модуля пружності B та критерію B/G) модельних структур показує, що роз-

чинення вуглецю в ГЦК залізі веде до закономірного зниження пластичності (критерій $B/G < 1,75$) поряд із зменшенням модуля об'ємної пружності. Наступне розчинення Mn веде інтенсивного росту пружності та незначного росту в сторону збільшення пластичності, а подальше розчинення кремнію веде до переходу матеріалу у пластичний стан поряд із незначним зниженням B (рис. 2).

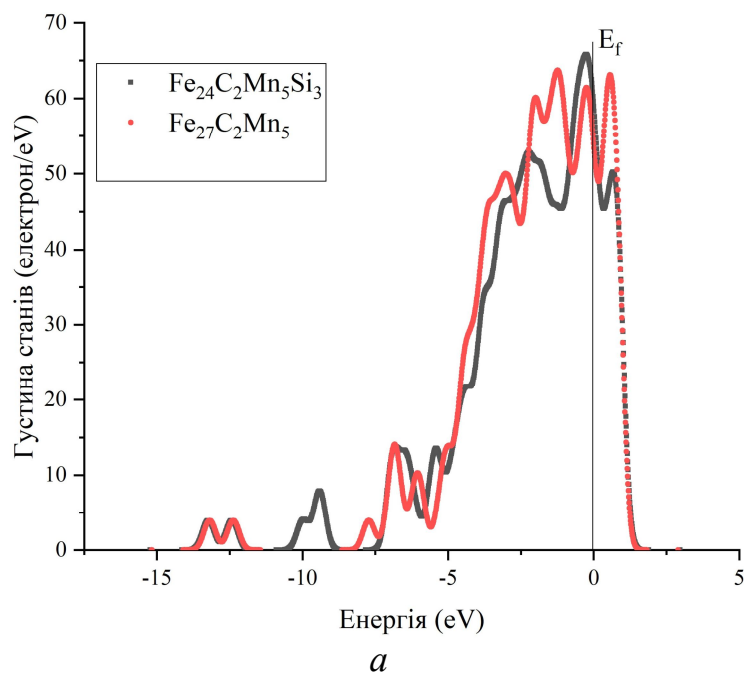
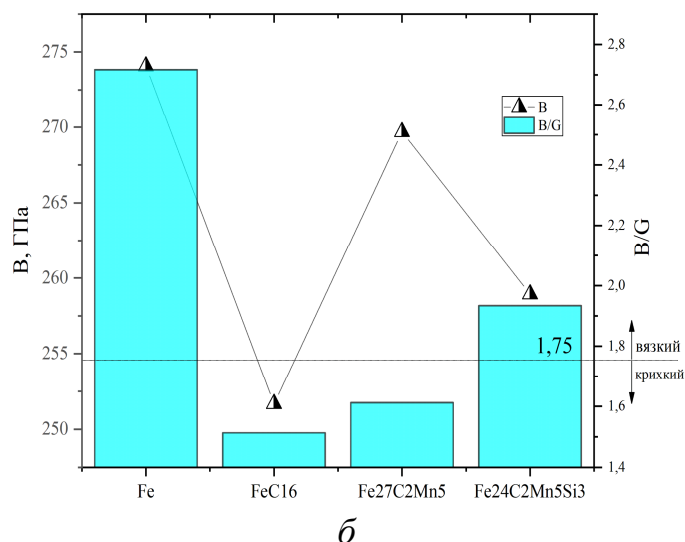


Рис. 2 – Густина станів складу (а) для аустеніту різного формульного складу та пружні характеристики (б)



Таким чином, за результатами модельних розрахунків видно, що у загальному випадку при розчиненні кремнію в марганцевому аустеніті буде спостерігатись збільшення його стабільності та пластичності. При цьому передумов втрати повної або часткової здатності аустеніту до деформаційного зміцнення немає, оскільки розчи-

нення кремнію не викликає кардинальної зміни в густині енергетичних станів, яка корелює із енергією дефектів пакування – ключовою характеристикою процесу деформаційного зміцнення при мікродвійникуванні.

Література

1. Seki, I. Lattice constant of iron and austenite including its supersaturation phase of carbon / I. Seki, K. Nagata // ISIJ internat. – 2005. – № 45(12). – P. 1789–1794.

2. Dong, N. Composition optimum design and strengthening and toughening mechanisms of new alumina-forming austenitic heat-resistant steels / N. Dong, R. Jia, J. Wang, G. Fan, X. Fang, P. Han // Metals. – 2019. – № 9(9). – P. 921.

Прохоров Д.В., Коржов В.П. Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия

СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖАРОПРОЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ Nb–V

Актуальной задачей современного материаловедения является разработка конструкционных жаропрочных материалов, способных работать при 1300 °С и выше. Одними из немногих таких представителей являются (Nb–Al)-сплавы. На их основе нами были получены и исследованы слоистые композиты из твердого раствора Al в ниобии с упрочнением интерметаллидами Nb₂Al и Nb₃Al. В этой работе предприняты исследования по влиянию ванадия на свойства Nb/Al-композитов, так как по данным значительного количества работ о влиянии ванадия на механические свойства различных сплавов, легирование им приводит к улучшению пластичности сплавов. Это имело бы большое значение для жаропрочных Nb/Al-композитов. Слоистые композиты с слоистыми структурами получали по твердофазной технологии с использованием диффузионной сварки многослойных пакетов из фольг сплавов Nb–V, чередующихся с Al-фольгами. Содержание ванадия в сплавах: 5, 10 и 15 ат.%. Сварка: 500 °С/15 мин + 1700 °С/30 мин/30,6 МПа. После сварки пакеты имели размер 35×20×2 мм.

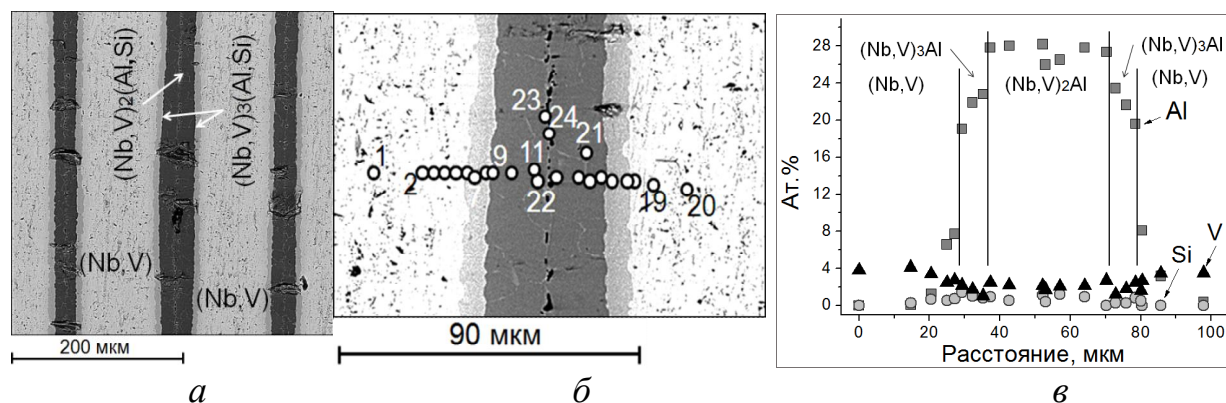


Рис. 1 – Композит из сплава Nb–5V: структура поперечного сечения композита (а) и микроструктура (б) и локальный рентгено-спектральный анализ (в) зоны диффузионного взаимодействия Al-слоя с (Nb–V)-сплавом: (Nb,V) – слабый Al-твердый раствор в сплаве; 1–24 – точки анализа

Структура поперечного сечения композита (рис. 1, а, б) представляла чередование (Nb,V)-слоев толщиной до 100 мкм и темных слоев зоны взаимодействия сплава с алюминием толщиной 35–45 мкм, которые при большем увеличении имели 3-слойную структуру. По данным локального РС-анализа (рис. 1, в) структура слоев в композите (Nb5V)/Al состояла из слоя соединения (Nb,V)₂(Al,Si) толщиной 30–35 мкм, заключенного между двумя тонкими (5–8 мкм) слоями (Nb,V)₃(Al,Si). В обоих соединениях обнаружено ~0,5 ат.%Si, присутствовавшего как примесь в Al. Распределение ванадия: в ниобии – до 4 ат.%, в слоях интерметаллических соединений Nb₃Al и Nb₂Al – 0,5 и 1 ат.% соответственно. В центре слоя (Nb,V)₂(Al,Si) обнаружены строчки темных включений Al₂O₃ (точки локального РСА – 23 и 24).

Испытания на изгиб. Предел прочности, усредненный по 3-м образцам, в зависимости от содержания ванадия в сплаве Nb–V повышался от 660 до 1215 при комнатной температуре и от 270 до 390 МПа – при 1300 °С. Нагрузка прикладывалась перпендикулярно слоям. Изгиб при комнатной температуре показал вязкопластичный характер разрушения. Пологий максимум на кривых нагрузка-перемещение (рис. 2) соответствовал прогибу, равному 400 мкм, и дальше образцы изгибались, не разрушаясь, вплоть до прогиба, 700–800 мкм. Разрушение характеризовалось «расслоиным» механизмом вдоль хрупких интерметаллических составляющих композита.

Испытания на ползучесть (рис. 3, табл. 1). Экспериментальные зависимости ползучести для композитов, испытанных при 1300 °С представлены на рис. 3. Оценивалась, 100-часовая проч-

ность или величина напряжения, вызывающего в композите деформацию, равную 1% за 100 часов.

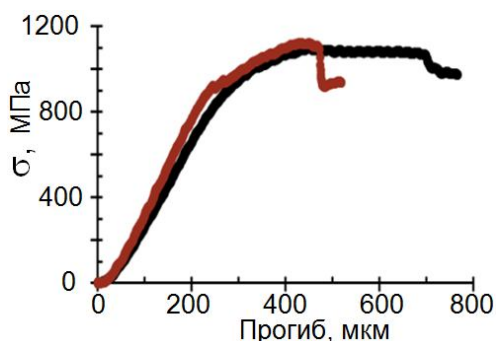


Рис. 2 – Кривые испытаний композита Nb10V/Al при комнатной температуре

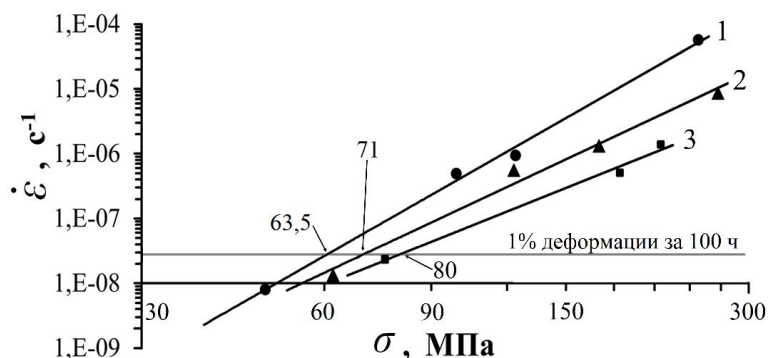


Рис. 3 – Зависимости скорости деформации ползучести $\dot{\epsilon}$ от напряжения σ для композитов Nb5V/Al (1), Nb10V/Al (2) и Nb15V/Al (3) при 1300 °C

Таблица 1 – Результаты испытаний композитов на ползучесть (см. рис. 3)

Композит	100-часовая прочность σ_{100} , МПа	Показатель степени, n
Nb5V/Al	63,5	3,75
Nb10V/Al	71,0	4,40
Nb15V/Al	80,0	5,73

Результаты по 100-часовой прочности, полученные здесь для композитов на основе сплавов Nb–V, сравнимы с аналогичными данными для (Nb–Si)-сплавов эвтектических составов [1], но по вязко-пластичным свойствам композиты (NbV)/Al намного превосходят их. Большой показатель степени n указывает на чувствительность композитов к изменению напряжения. Это может негативно сказываться на эксплуатационных свойствах материала.

Литература

1. Карпов М. I. Niobium-base refractory alloys with silicide and carbide hardening current status and prospects // Metal Science and Heat Treatment, 2018, v. 60, No. 1–2, p. 7–12.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-33-01266 мол_а.

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ І КІЛЬКОСТІ КИСНЮ У ПУЛЬСУЮЧОМУ РОЗПИЛЮВАЛЬНОМУ СТРУМЕНИ ПРИБ ДУГОВІЙ МЕТАЛІЗАЦІЇ

При електродуговому напиленні хімічний склад покриття, а значить і його якість, визначається впливом кисню повітря на матеріал, який розпилюється.

З метою зниження окисного впливу розпилювального струменя на рідкий метал торців, що плавляться, пропонується вико ристовувати пульсуючий розпилювальний струмінь повітря

Конструктивно пульсуючий пристрій являє собою циліндричний корпус з вхідним і вихідним патрубком для підведення і виведення стисненого повітря, всередині якого встановлено вал з отвором і можливістю обертання.

Характер зміни об'єму повітря, що проходить через сопло в залежності від частоти пульсацій потоку для значень періоду відкриття каналу $p = 80\%$ при різних положеннях пульсатора наведено на рис. 1, за розрахунковими даними, де видно, що обсяг розпилювального повітря значно знижується в залежності від частоти пульсацій, яка підвищується, і ступеня перекриття сопла металізатора.

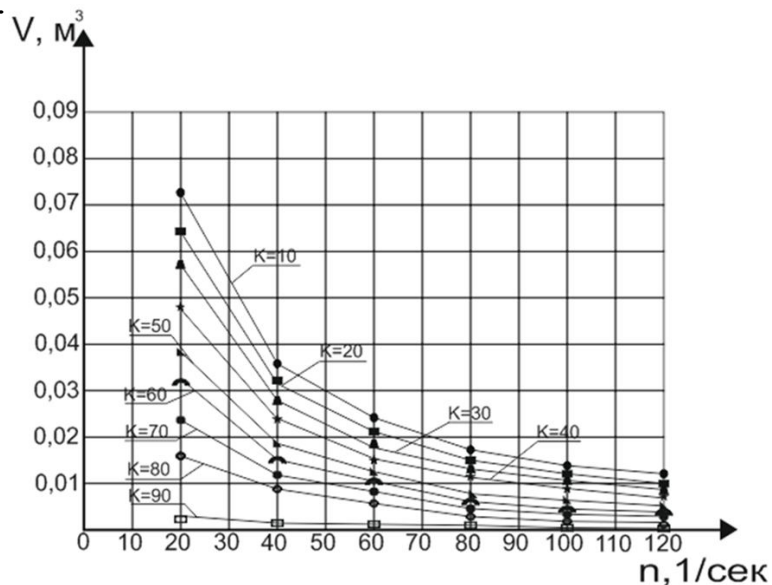


Рис. 1 – Вплив частоти імпульсів на обсяг повітря, що проходить скрізь сопло для значень періоду відкриття $p = 80\%$, до рівня відкриття $K = 0,1–0,9$ протягом 60 с

Особливий вплив на вигорання елементів має кисень, який знаходиться в загальному обсязі повітря, що подається з визначеною частотою, тому необхідно розрахувати саме масу кисню. Визначимо кількість кисню в розпилювальному струмені при одному повороті клапана пульсатора, для витрати повітря $2 \text{ м}^3/\text{хв}$.

$$m_{ni} = V_b^n \cdot a_{O_2} \cdot \gamma_{O_2},$$

де a_{O_2} – об'ємний відсоток вмісту кисню в повітрі (приймаємо 21%); V_b^n – обсяг повітря при частоті n за час T при витраті; γ_{O_2} – питома вага газу кисню при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску 760 мм. рт. ст. , $1,3 \text{ г/л}$. Маса кисню із загального потоку, для різних положень клапана пульсатора (k) визначається з рівняння:

$$m_{ki} = \frac{G \cdot p \cdot T \cdot (1 - k)}{n} a_{O_2} \gamma_{O_2}$$

Результати розрахунків маси кисню в розпилювальному потоці наведені на рис. 2. З рис. 1 і 2 видно, що обсяг повітря і маса кисню розпилювального струменя знижується з ростом частоти пульсацій в кілька разів.

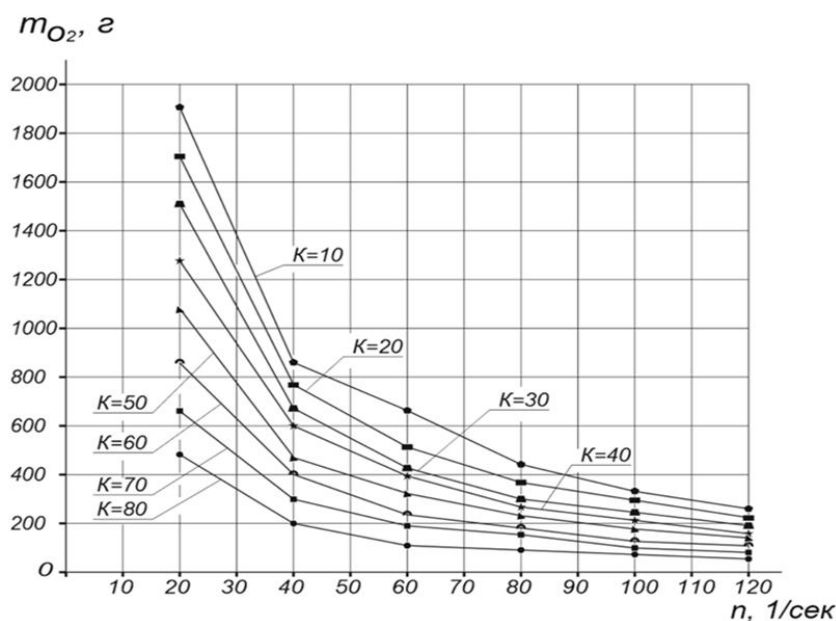


Рис. 2 – Вплив частоти імпульсів пульсатора на величину маси кисню повітря, що проходить через сопло (для значень $p = 80\%$, $K = 0,1-0,9$ протягом 60 с)

Інтенсивність потоку повітря, а також відповідно маси кисню, зменшується в залежності від ступеня перекриття каналу сопла пульсатора.

Використання пульсуючого розпилувального потоку при дугової металізації, дасть можливість отримати покриття з високими технологічними властивостями, за рахунок збереження кількості легуючих елементів.

Рояов В.А., Захарова И.В., Крючков Н.С.
Приазовский государственный технический
университет, Мариуполь, Украина

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА НА ДИСПЕРСНОСТЬ ЧАСТИЦ ПРИ ДУГОВОМ НАПЫЛЕНИИ

При электродуговом напылении имеет место интенсивное окисление распыляемого металла за счет кислорода воздуха, что приводит к значительному уменьшению содержания легирующих элементов в покрытии.

С целью снижения окислительного воздействия распыляющей струи на жидкий металл торцов плавящихся электродов авторами предложен и разработан способ периодического (пульсирующего) воздействия на жидкий металл электродов воздушной распыляющей струи с учетом того, что пауза между моментами действия потока позволяет обеспечить плавление электродов с ограниченным объемом воздуха.

Частоты, при которых производилось напыление, были от 20 до 120 Гц. Выбирая точную частоту с помощью цифрового осциллографа были произведены пробный напыл в специальную емкость. Разработанное устройство для сбора частиц (рис. 1) включает емкость 4, в которую налита вода 6. Струя частиц и газа 2 из металлизатора 1 попадает через центральное отверстие крышки 3, трубу 5 в воду. Диаметр отверстия обеспечивает идеальное попадание всех капель распыляемого материала в воду. Высота трубки Н выбирается так, чтобы расстояние от сопла металлизатора до воды имело рабочую дистанцию. Для сброса избыточного давления воздуха, внутри емкости, на крышке 3 предусмотрены отверстия. Попадая в воду 6, частицы остывают и оседают на поддон 7 выполненный из нержавеющей стали.[2]

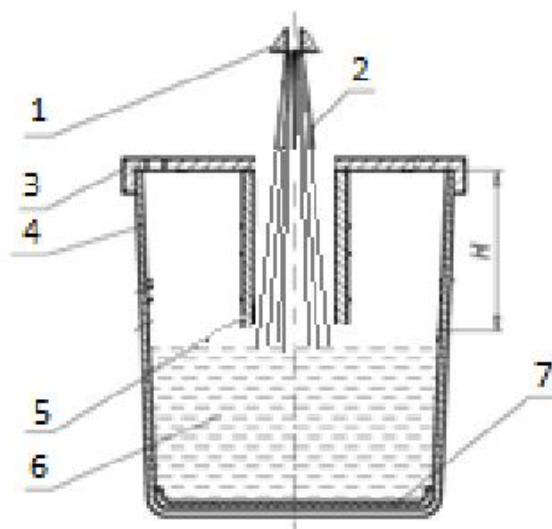


Рис. 1 – Устройство сбора капель для измерения фракционного состава

Полученный порошок, собранный на поддон в процессе напыления, просушивается в течение 1 часа при температуре 180 °С. Фракционный состав частиц определяли методом ситового анализа по массовому содержанию.

Представленные результаты (рис. 2) позволяют сделать вывод, что фактором определяющим дисперсность частиц при электродуговом напылении пульсирующим распыляющим потоком является энергия электрической дуги.

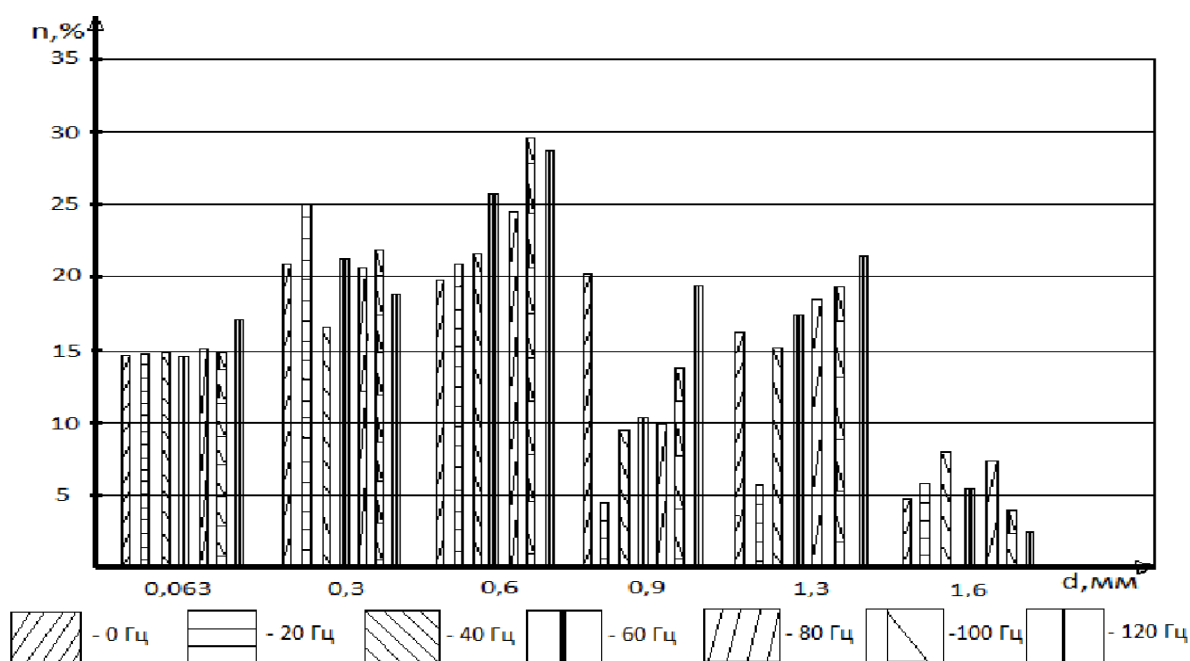


Рис. 2 – Характерные изменения дисперсности частиц в зависимости от частоты пульсаций при ЭДМ с применением пульсирующей распыляющей струи, распыляемый материал – 10Г2Б

При низких частотах (20–30 Гц) подачи воздуха возможно повышенное накопление жидкого металла при отсутствии действий потока, что приводит к увеличению размеров частиц или к короткому замыканию

При средних частотах (40–60 Гц) время образования жидкого металла на торцах электродов совпадает с частотой импульсов распыляющего потока, при этом размеры частиц оптимальные, как и при без импульсном распылении.

При повышенных частотах действия потока, вероятно, имеет место, когда жидкий металл не накопился на торцах электродов во время паузы и срывание его потоком воздуха осуществляется при повторном (несколько раз) воздействии распыляющего потока.

Рябченко С.В. Институт сверхтвердых материалов
им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРОФИЛЬНЫМИ КРУГАМИ ИЗ ХРОМИСТОГО КОРУНДА

Одним из наиболее эффективных технологий применения шлифовальных кругов из хромистого электрокорунда является шлифование закаленных зубчатых колес. Это шлифовальные круги для разных методов зубошлифования, тарельчатые круги (тип 12) для станков «MAAG», конические круги (тип 4) для станков «Niles» и червячные круги (тип 1) для станков «Reishauer» (рис. 1).



Рис. 1 – Шлифовальные круги из хромистого корунда:

а – тарельчатые круги для станка «MAAG», *б* – конический круг для станка «Niles», *в* – червячный круг для станка «Reishauer»

Нами проведено исследование процесса профильного шлифования зубчатых колес кругами из хромистого корунда на шлифо-

вальном станке модели HÖFLER RAPID 1500 в условиях завода «МАГМА» (г. Мариуполь). Для испытаний мы использовали конические шлифовальные круги из хромистого корунда (A89 60 K 9 V) диаметром 400 мм с углом конуса 40° и 60°. Результаты испытаний, показали, что производительность обработки коническими кругами из хромистого электрокорунда повышается в 1,5 раза по сравнению с коническими кругами из белого электрокорунда.

Аналогичные испытания абразивных кругов из хромистого корунда (A98 46 L 9 V) диаметром 400 мм и 450 мм, были проведены при профильном шлифовании крупномодульных зубчатых колес ($m = 10$ мм) на станке «KAPP-NILES» модель ZP12 в условиях предприятия ЧАО «НКМЗ» (г. Краматорск). Результаты испытаний показали значительное преимущество шлифования кругами из хромистого корунда по сравнению к кругам из белого корунда.

Для более широкого исследования процесса профильного зубошлифования, нами были проведены испытания кругов из монокристаллического электрокорунда диаметром 400 мм (3SG46Hs12VS). Шлифование зубчатых колес производилось на зубошлифовальном станке с ЧПУ мод. «HÖFLER RAPID 1250» в условиях завода «Свет Шахтера» (г. Харьков) (рис. 2).

Испытание высокопористого шлифовального круга из монокри-

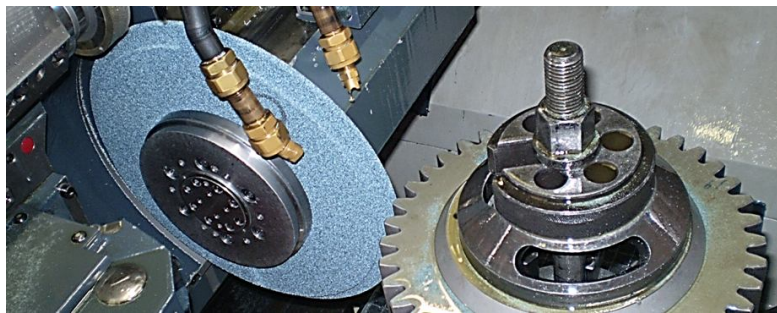


Рис. 2 – Установка шлифовальных кругов 3SG46Hs12VS на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250

сталлического электрокорунда производили в сравнении с шлифовальным кругом из белого корунда (25A46L6V).

Результаты замера мощности зубошлифования кругом из белого корунда и круга из монокристаллического

корунда показали значительное снижение мощности шлифования с 1800 Вт (белый корунд) до 560 Вт (монокристаллический корунд). При чистовом шлифовании изменение мощности еще более значительно. Результаты измерений параметров точности зубчатых колес показали повышение точности (профиля эвольвенты) обработки кругами из монокристаллического хромистого корунда.

Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Веремейчик А.И.,
Кондратюк В.О., Старикевич М.О. Брестский
государственный технический университет, Брест, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ДРОБИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ПОСЛЕ ОБЪЕМНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ

При использовании установок для дробления древесных отходов мебельного и других производств применяются детали (ножи) в виде усеченной пирамиды из стали 40Х. Такие детали упрочнялись с помощью объемной закалки. В процессе эксплуатации ножи подвергались механическому изнашиванию и воздействию динамических нагрузок, в результате чего происходил не только интенсивный износ их режущей части, но и выламывание кусков металла. Такой вид разрушения характерен при упрочнении объемной закалкой и обусловлен возникновением в металле значительных механических напряжений и охрупчивания стали.

Чтобы исключить возникновение таких дефектов в материале, предложено использовать локальную поверхностную закалку режущей кромки дробильного инструмента движущейся плазменной дугой. Проведено исследование износа ножей после двух видов термообработки. Для определения степени износа выбирались две партии по пять деталей, упрочненных объемной закалкой и упрочнением с помощью плазменной дуги, которые соответствовали следующему времени эксплуатации: № 1 – базовая деталь (неэксплуатируемая); № 2 – после месячной эксплуатации; № 3, № 4, № 5 – после 2-х, 3-х, 4-х месячной эксплуатации соответственно.

Сравнительные измерения профиля детали выполнялись на измерительном комплексе с лазерным сканированием Mistral 070705 фирмы BROWN&SHARPE с программным обеспечением PC-DMIS PRO Software, позволяющего производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля. По результатам измерений определялась форма детали и результаты обрабатывались программой SolidWorks, с помощью которой строилась трехмерная модель детали (рис. 1).

Далее деталь разделялась плоскостями *A-D* на части, с выделением плоскостью *T* исследуемого фрагмента (рис. 2).

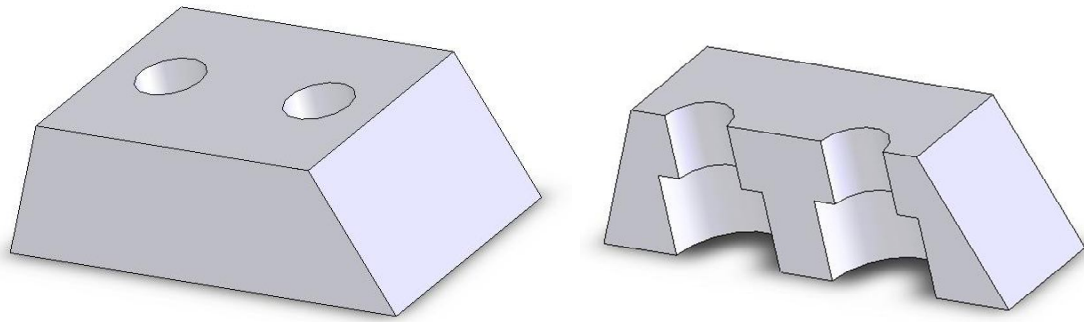


Рис. 1 – Компьютерная модель ножа

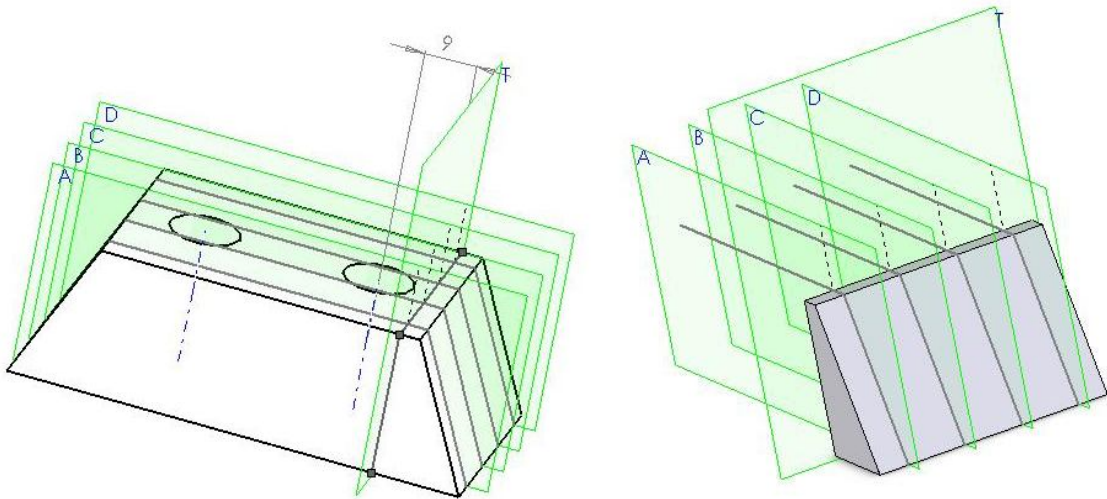


Рис. 2 – Положение плоскостей для анализа исследуемого фрагмента

На сгенерированных кривых были построены поверхности, на основе которых созданы элементы анализируемых частей детали. Используя плоскости *A-D*, построены плоские элементы соответствующих фрагментов деталей. С помощью программы AutoCAD вычислены площади рассматриваемых элементов. Для вычисления параметра износа детали использовалась формула:

$$\Phi_{nm} = \frac{S_{1m} - S_{nm}}{S_{1m}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где Φ_{nm} – относительный процент износа детали, S_{nm} – площадь анализируемого сечения для соответствующей детали n в соответствии с плоскостью m ; n – номер детали ($n = 1-5$), m – наименование соответствующей плоскости ($m = A, B, C, D$).

На основании полученных данных построены зависимости относительного износа деталей, упроченных объемной закалкой и поверхностной плазменной закалкой (рис. 3).

Срок эксплуатации дробильного инструмента после поверхностной плазменной закалки увеличен в 2,1 раза по сравнению с объемной закалкой.

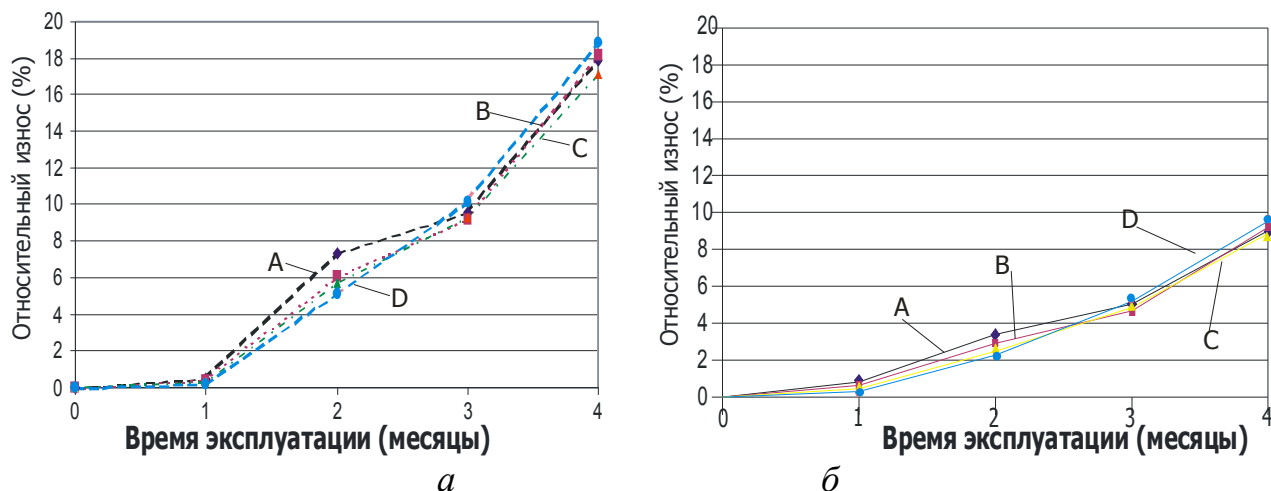


Рис. 3 – Графики износа ножей, упрочненных:
 а) объемной закалкой; б) поверхностной плазменной закалкой

Саленко А.Ф. Киевский политехнический институт им. Игора Сикорского, Киев,
Елизаров М.А., Щетинин В.Т., Лашко Е.Е.,
Аль-Кураан Тарек М.А. Кременчугский национальный университет им. Михайло Остроградского, Кременчуг
Клименко С.А. Институт сверхтвёрдых материалов им. В.М. Бакуля, НАН Украины, Киев Украина

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ХЕМОГРАФИИ

С позиций представлений о развитии повреждений квазихрупких тел любая трещина обладает излишком энергии. Можно предположить, что перед наступлением лавинообразного высвобождения энергии разрушения, последняя активизирует химические процессы сверхмалых концентраций веществ.

Оценить такую активизацию химических процессов в области микродефектов в структуре материалов позволяет метод хемографии [1], в основе которого лежит использование явления активации химических гетерогенных процессов сверхмалых концентраций веществ, которые протекают в местах поверхностного возбуждения исследуемого тела и фиксируются в виде участков разной степени потемнения, например на рентгеновской фотопленке.

Разрастание затемненного ареала свидетельствует о местах, где зародившиеся микродефекты готовы активно развиваться, что, в конце концов, приведет к наступлению макроповреждения, и, как следствие, проявлению отказа. Степень потемнения позволяет качественно и количественно оценить работоспособность нагружаемых изделий, например режущих инструментов, и интенсивность развития повреждения их рабочих участков при эксплуатации. Сравнительная хемографические изображения с рабочих поверхностей инструмента при различном времени эксплуатации с эталонными, можно оценить состояние инструмента и спрогнозировать период его работы. При этом критерием имеющихся на поверхности инструмента дефектов выступает изменение степени потемнения, которая возрастает с увеличением количества дефектов на исследуемой поверхности.

В настоящей работе основное внимание было направлено на установление связи между увеличением степени и площади хемографического потемнения контролируемой поверхности инструмента с наступлением его критического повреждения.

Если поток отказов λ определять на основании статистического наблюдения за работой N инструментов, то большинство внезапных отказов будет подчиняться экспоненциальному закону вида $P(\tau) = e^{-\lambda\tau}$, а функция плотности распределения будет иметь вид $f(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau}$. При этом параметр потока отказов может быть получен исходя из $\lambda = 1/T_{cp}$, где T_{cp} – среднее время наступления внезапного функционального отказа, в нашем случае – выкрашивания или скола на исследуемом участке инструмента.

В таком случае, среднее время наступления отказа можно увязать с потемнением поверхности при хемографическом исследовании, принимая во внимание, что чем интенсивнее затемняется исследуемый участок инструмента при сравнении двух хемографических картин (I_{mi} – индекс потемнения), полученных через определенное время, тем меньшим будет время до наступления отказа – $T_{cp} = f[1/(I_{m2} - I_{m1})]$; $I_{mi} = F_i/(100 - F_{min})$, где F_i – текущее потемнение участка на анализируемой поверхности (%); F_{min} – область светлого фона (в % относительно принятого уровня белого).

Если во внимание берется изменение площади участка потемнения поверхности инструмента S (%), то зависимость будет подобной. Данное предположение проверялось по эволюции хемографических картин участков потемнения в области вершины резца, оснащенного твердым сплавом Т15К6, при точении нержавеющей

стали X18H10T. При этом программным способом измерялся индекс потемнения I_m и площадь потемнения S на растре рабочих граней и были построены зависимости изменения контролируемых параметров от времени эксплуатации инструмента (рис. 1).

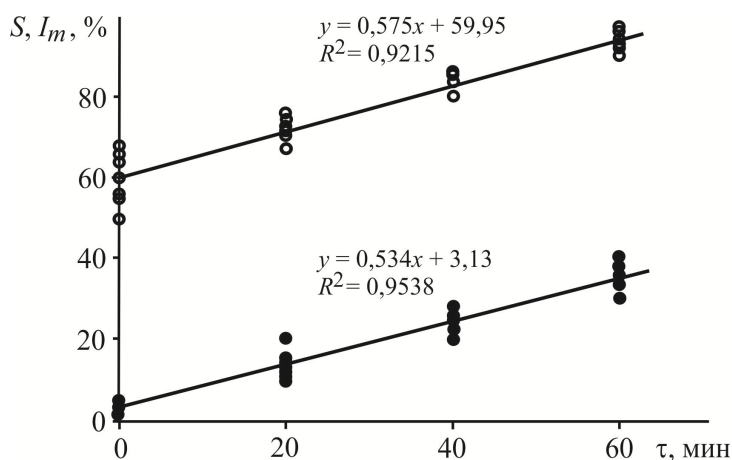


Рис. 1 – Изменение контролируемых параметров в зависимости времени резания (○ – I_m , ● – S)

Учитывая, что в начальный период резания параметр I_m оценивался с достаточно существенным рассеянием (более $\pm 12\%$), параметр S оказался более информативным для исследования работоспособности инструмента на всем периоде эксплуатации – вплоть до наступления отказа. При этом изменение площади темной зоны для рассматриваемого твердосплавного инструмента происходило практически линейно, что позволяет постулировать уравнение вида $T = b_0 + b_1 S$. В тоже время, нужно учитывать, что коэффициент b_1 , определяющий нарастание контролируемого параметра, не является постоянным, а зависит от интенсивности термобарического нагружения инструмента в контактной зоне.

Приняв во внимание хемографические картины начального состояния инструмента и его состояния после 60 мин эксплуатации, получена зависимость, которая позволяет определить время до наступления внезапного отказа инструмента (рис. 2)

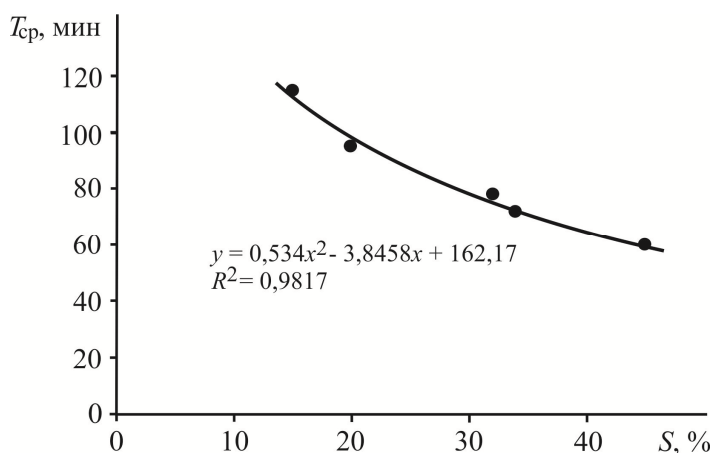


Рис. 2 – Изменение прогнозируемого времени наступления отказа в зависимости от площади участка потемнения на поверхности инструмента

По времени T_{cp} оценивался параметр потока отказов λ , а по нему – $P(\tau)$ и $f(\tau)$. Статистическая обработка выборки с помощью χ^2 критерия Пирсона показала ее соответствие однопараметрическому экспоненциальному закону распределения.

Проведенные исследования подтвердили предположение о возможности прогнозирования времени наступления внезапной потери работоспособности инструмента на основе анализа хемографических картин с его рабочих поверхностей, соответствующих конкретным условиям термобарического нагружения. Отмеченный эффект определяется начальным несовершенством поверхностного слоя инструмента и его деградацией в процессе эксплуатации.

Литература

1. Yelizarov M. Visualization of early stages of corrosion processes by a chemography method // Surf. and Interface Analysis. – 2006. – Т. 38. – С. 263–266.

Саленко О.Ф. Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського, Київ,
Шепеленко І.В., Будар Мохамед Р.Ф.
Центральноукраїнський національний технічний
університет, Кропивницький, Україна

ФОРМУВАННЯ АЛМАЗОВМІСНИХ ШАРІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ ІНСТРУМЕНТУ

Відомо [1], що гібридизація та комбінування впливу може істотно підвищити ефективність обробки, особливо коли необхідно обробляти композиційні матеріали.

Такий підхід може застосовуватися і для абразивного інструменту (кругів, пилок реноватора, кільцевих свердел. При цьому формування окремих кластерів робочої поверхні, поділ її на зони різного силового, температурного та динамічного навантаження дозволить не тільки скоротити втрату абразивних зерен під час обробки, а й підвищити час його стійкості, особливо при обробці спеціальних композиційних матеріалів.

Існуючи різні способи нанесення алмазного шару на поверхні інструментів, які розрізняються способами формоутворення ріжучих поверхонь, способами закріплення абразивних зерен, видами матеріалів зв'язок [2]. Будь-який з перерахованих способів має свої переваги та недоліки, області доцільного застосування. При виготовленні алмазного інструменту застосовують обмежену кількість зв'язок, що містять в якості основи тільки легкоплавкі компоненти з температурою плавлення не вище 700 °С.

Однак на практиці для виготовлення алмазних інструментів використовують в основному три види технологічних процесів: гальванічне закріплення алмазів; методи порошкової металургії (гаряче пресування і брикетування); методи вакуумної технології (дифузійне зварювання алмазних зерен) [3].

Значне поширення при виготовленні алмазного інструменту отримав метод порошкової металургії, що полягає в пресуванні, спіканні гарячого допресування алмазовмісної суміші. Широко застосовується зв'язка М2-01 (МП) складається з олова і міді. Температура спікання цієї зв'язки становить 680–700 °С. Переваги порошкового інструменту полягають у стабільності властивостей при зносі інструменту; його відносної довговічності, м'якості шліфування, у зв'язку з тим, що відстані між зернами сприяють виходу відпрацьованого матеріалу з робочої зони. Недоліки порошкового інструменту: недостатня концентрація алмазних зерен на поверхні і за обсягом зменшує його продуктивність майже в 2 рази порівняно з гальванічним інструментом; трудомісткість виготовлення інструментів вакуумно-дифузійним зварюванням алмазних зерен полягає в з'єднанні попередньо металізованих алмазних зерен розплавом зв'язки. При температурі понад 1000 °С у вакуумному середовищі відбувається з'єднання металізованих зерен з металевою зв'язкою. Створений таким чином алмазний інструмент має ряд незаперечних переваг [4].

З усіх способів закріплення алмазів технологія гальванічного закріплення зерен є найбільш простою і дешевою. Ця технологія розроблена на основі електролітичних властивостей речовин. Матеріал, на якому створюється алмазний шар занурюють у розчин електроліту з алмазної сумішшю, потім через електроліт пропускається електричний струм і на робочій поверхні можна отримати алмазний шар 0,3 мм від його товщини [5].

Найбільш перспективним і ефективним способом виготовлення універсальних інструментів є спосіб пошарового лазерного спікання порошкових композитів [6].

Як джерело нагріву лазерне випромінювання має ряд значних переваг, яке дозволяє за рахунок високої швидкості безконтактного введення енергії в матеріал і її прецизійного дозування здійснювати надшвидкісне нагрівання локальних областей матеріалів в широкому діапазоні температур. Висока локальність процесу дозволяє пошарово формувати одно- або багаторядні алмазовмісні робочі елементи і таким чином отримувати інструменти практично будь-якої конфігурації, досить легко керувати концентрацією складових композитів, здійснювати термічне зміцнення зв'язки, отримувати структури, що мають високу дисперсність.

Таким чином, можна зробити висновок, що саме лазерне спікання внаслідок високої керованості процесу, можливості регулювання умов спікання та дозування алмазних зерен, а також локальності впливу (локалізація може сягати мікроскопічних ділянок поверхневого шару) може бути взятий за основу для реалізації функціонально-орієнтованого підходу до створення спеціального інструменту для оброблення певних видів сучасних композиційних матеріалів.

Література

1. Salenko, O. On the Application of the Functional Approach to the Methods of Processing Layered Superhard Composites / O. Salenko, E. Lashko, V. Shchetynin et al. // J. of the Techn. Un-ty of Gabrovo. – P. 13–19.

2. Новиков, Н.В. Новые сверхтвердые материалы и их применение в промышленности/ Н.В. Новиков, А.А. Шульженко // Сверхтв. мат. – 1987. – № 5. – С. 9–14.

3. Инструменты из сверхтвердых материалов : уч. пособие / под ред. Н.В. Новикова. – К. : ИСМ НАНУ, 2002. – 528 с.

4. Yang, N. Vertically aligned diamond nanowires: Fabrication, characterization and application for DNA sensing / N. Yang, H. Uetsuka, O.A. Williams et al. // Physica Status Solidi A: Applicat. Mat. Sci. – 2009. – 206(9). – P. 2048–2056

5. Сорокин, В.К. Изготовление тонких пластин и отрезных кругов с алмазными микропорошками / В.К. Сорокин, Л.С. Шмелев, А. Г. Елизаров // Сталь. – 1994. – № 7. – С.67–69.

6. Саленко, О.Ф. Забезпечення надійності роботи алмазовмісного інструменту, отриманого лазерним термодетформаційним спіканням, при обробці армованих вуглепластиків / О.Ф. Саленко, В.Т. Щетинін, В.І. Глухова и др. // Вісник Кременчуц. уац. у-ту ім. М. Остроградського. – 2019. - №3. – С.147–157.

Сахнюк І.О., Битков М.Х., Рудак Н.П. Поліщук Р.Ю.
Технічний центр НАН України, Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ І ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ В НАУКОВИХ УСТАНОВАХ

Упровадження національного стандарту ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT) «Системи управління якістю. Вимоги» в промисловості, вищих навчальних закладах знайшли певне висвітлення в наукових публікаціях. У сфері наукової діяльності застосування вимог цього стандарту потребує більш детального вивчення. Наукові установи організовують та здійснюють наукову та науково-технічну діяльність, що спрямована на створення нового наукового знання, нових або істотно вдосконалених матеріалів, процесів, пристроїв, технологій, систем тощо. Оскільки наукова діяльність специфічна, то її складно вмістити в універсальні схеми системи управління якістю, які будуть відповідати вимогам національного стандарту ДСТУ ISO 9001. Проте для успішного створення та функціонування системи управління якістю в наукових установах необхідно дотримуватись вимог цього стандарту, враховувати особливості наукової і науково-технічної діяльності установи та практику роботи її окремих структурних підрозділів. Загальні правила виконання науково-дослідної роботи встановлені стандартом ДСТУ 3973–2000 «Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання науково-дослідних робіт. Загальні положення». Положення цього стандарту є обов'язковими для науково-дослідних робіт, виконання яких повністю або частково фінансується з державного бюджету. Для науково-дослідних робіт, які виконують за рахунок обігових або власних коштів установ, підприємств, організацій та інших суб'єктів господарської діяльності, положення стандарту ДСТУ 3973 є рекомендованими.

Процес наукових досліджень охоплює широкий спектр робочих процесів — від аналітичних та допоміжних до практичного використання за призначенням або наукових відкриттів. Тому такий процес регламентувати рамками виробничого циклу одержання продукції — наукового, науково-прикладного результату майже неможливо. Від моменту формування запиту на відкриття наукової роботи або складання договору на проведення науково-дослідних робіт до моменту оцінювання замовником одержаного наукового результату може пройти певний час, тому потрібно враховувати потреби та очікування замовників наукових досліджень, ефективно проаналізувавши їх, визначивши стратегію щодо їх задоволення.

Важливою особливістю системи управління науковими установами є розгалужена система взаємовідносин між структурними підрозділами. На практиці такі підрозділи діють уособлено один від одного, вирішують завдання, які стоять суто перед окремим підрозділом, є фінансово незалежними один від одного, що ускладнює розроблення системи управління якістю для всієї установи. Складність упровадження системи управління якістю в наукових установах полягає в тому, що не всі вимоги, закладені у ДСТУ ISO 9001, можливо зазначити у відповідній документації наукової установи щодо об'єктів досліджень. Наприклад, постійна орієнтація на виконання вимог замовника (споживача) або прогнозування цих вимог; виявлення основних процесів діяльності, властивої для всієї наукової установи, в умовах, коли дослідження у структурних підрозділах, діяльність яких не перехрещується і є суто індивідуальною, виконують для об'єктів дослідження за різними науковими тематиками, методиками тощо.

На початку розроблення системи управління якістю в науковій установі необхідно намагатися чітко встановлювати вимоги до кінцевих результатів дослідження — наукової (науково-технічної) продукції. Слід враховувати, що результати наукових досліджень переважно являють собою кінцеву нематеріальну (нетоварну) продукцію та оформлюються у вигляді звіту про наукові дослідження, проекту технічного завдання, в якому викладають вихідні дані для створення майбутньої продукції, наукової доповіді, наукового повідомлення про науково-дослідну роботу, монографічного дослідження, наукового відкриття, проекту нормативно-правового акта, нормативного документа або науково-методичних документів тощо. Щодо матеріального кінцевого результату, то для прикладних

досліджень та розробок це можуть бути експериментальні, дослідні зразки або вироби одиничної продукції.

Однією з основних вимог ДСТУ ISO 9001 є виявлення основних процесів діяльності установи і їх документальне описування. Проте процеси наукових досліджень практично неможливо однозначно виявити, описати та логічно пов'язати між собою. Складно також встановити послідовність виконання процесів, що перетворюють входи на виходи. Окрім складності у детальному описуванні основних процесів наукових досліджень у наукових підрозділах установ мають значення також і певні допоміжні процеси, які під час документування системи управління якістю треба враховувати і пов'язувати з основними процесами.

Визначення структури і складу документації системи управління якістю для наукової установи – одне з найбільш принципових питань її створення. Науковій установі притаманна багаторівнева система документації. Перший рівень системи документації складається з документів, що діють у всій науковій установі, в усіх його структурних підрозділах (наукових, фінансових, адміністративно-господарських тощо). Другий рівень — документація окремих підрозділів, що описує специфічні види їх діяльності. Третій рівень включає документацію, що охоплює спільну діяльність декількох підрозділів, а також описує наскрізний процес. Для того, щоб система управління якістю працювала у відповідності до встановлених вимог і постійно вдосконалювалася, документи системи управління якістю не повинні загубитися у масі інформації, яку використовують у наукових установах фахівці всіх рівнів під час роботи, але усі працівники повинні мати певні навички, необхідні для пошуку потрібного документа і правильного його застосування. Особливості управління людськими ресурсами, що є складником системи управління якістю, стосуються оцінювання діяльності наукового працівника. У процесі проведення наукових досліджень беззаперечним є особистий вклад і досвід дослідника, його кваліфікація та компетентність. Проте висока кваліфікація наукових працівників окремих спеціальностей не передбачає наявності знань про ефективний менеджмент, а знання щодо якості можуть бути обмежені знаннями про якість продукції. Але оцінювання індивідуального внеску наукового працівника має здійснюватися з урахуванням його діяльності у прискоренні впровадження результатів роботи за призначенням. Найчастіше зв'язок

між внеском дослідника та кінцевим результатом дослідження є невизначеним, а сам результат важко об'єктивно оцінити. Важливим складником упровадження системи управління якістю є проблема розкриття в документах питання мотивації працівників, оскільки від мотивації наукових працівників і працівників управлінських та допоміжних підрозділів залежить якість наукової (науково-технічної) продукції.

Отже, ДСТУ ISO 9001 установлює вимоги, націлені насамперед на забезпечення довіри до продукції та послуг, та на підвищення задоволеності замовника. Під час побудови та запровадження системи управління якістю в науковій установі необхідно брати до уваги такі особливості, як її структура; наукова тематика підрозділів; фінансова незалежність одних підрозділів установи від інших; специфічність описування процесів, які виконують під час досліджування; багаторівнева система документації; доступ до першоджерел та інформації тощо. За належного запровадження ДСТУ ISO 9001 наукова установа також може очікувати вигоди крім зазначених вище, як-от поліпшене внутрішнє інформування, краще розуміння та контролювання процесів підрозділів наукової установи.

Сенюць В.Т. Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ТЕРМОБАРИЧЕСКОГО СПЕКАНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Импактные алмазы, а точнее алмаз-лонсдейлитовый абразив (АЛА) Попигайского месторождения, – новый вид минерального сырья, не представленный на рынке и потому пока никак не используемый. Между тем, АЛА обладает выдающимися технологически свойствами, в первую очередь, высокой абразивной способностью, в 1,5–2 раза превосходящей абразивную способность природных технических и синтетических алмазов [1, 2]. Данное качество обусловлено особенностью структуры АЛА, представляющего собой наноструктурированный композит на основе алмазной и лон-

сдейлитовой фаз. Благодаря наноразмерной поликристаллической структуре АЛА имеют преимущество перед обычными алмазами, частицы которых представляют собой монокристаллы. Поэтому АЛА перспективны для изготовления алмазного инструмента и модифицирования различных материалов (карбидокремниевой керамики, сверхтвёрдых поликристаллов на основе алмаза и КНБ и др.).

Перспективным является также использование импактных алмазов и композитов на их основе в качестве абразивного и полировального материала в процессах формирования нанорельефа прецизионных поверхностей металлов и хрупких неметаллических материалов, что позволит значительно повысить производительность обработки и качество деталей машиностроения, электронной, оптической и лазерной техники [3, 4]. При получении алмазно-абразивного инструмента на металлической (железной) основе для улучшения алмазодержания в состав связки вводят адгезионно-активные элементы (хром, титан, ванадий и др.), которые в процессе спекания проникают в дефекты на поверхности абразивных зерен, взаимодействуют с поверхностью алмаза с образованием соответствующих карбидов, создают переходный диффузионный слой между основой и металлом покрытия алмазных зерен [5]. В данной работе для спекания алмазно-абразивного наноструктурного материала применяли адгезионно-активную добавку состава Fe–20% Ti, полученную методом механического сплавления компонентов, в ходе которого формируется композиционная связка на основе твердого раствора титана в железе и интерметаллидов Fe–Ti [6].

Спекание материала проводили при давлениях 1,5–4,5 ГПа в аппарате высокого давления типа «трапеция» в диапазоне температур 1250–1450 °С. В результате термобарического спекания были получены компактные цилиндрические образцы диаметром 10 и высотой 8 мм. Микротвердость металлической матрицы композита, измеренная методом Виккерса при нагрузке 100 г, составляет 4,7–8 ГПа, микротвердость отдельных зерен АЛА находится в пределах 17,5–20 ГПа. На рис. 1, *a*, *b* приведена структура (*a*- съемка методом АСМ и *b*- съемка методом СЭМ) спеченного композита на основе импактных алмазов. На рис. 1, *b* показано, что наряду с крупными алмазными зёрнами в матрице наблюдаются мелкие (1–10 мкм) частицы алмаза, образовавшиеся в результате дробления под давлением исходных зерен АЛА. Формирование дисперсно-упрочненной струк-

туры приводит к повышению износостойкости полученного композита по сравнению с алмазными композитами, изготовленными по традиционной технологии.

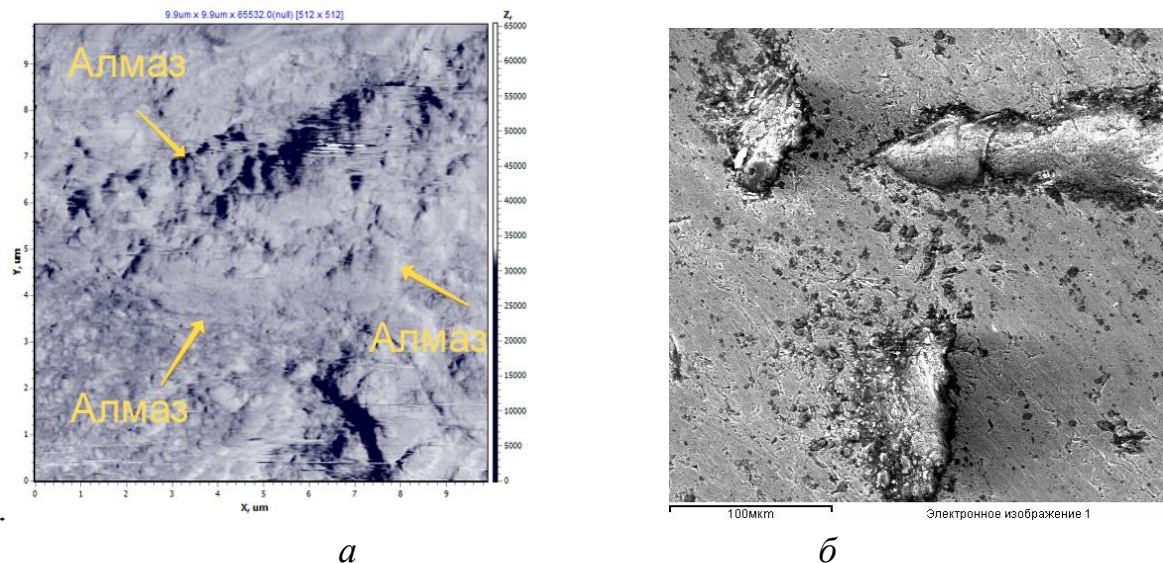


Рис. 1– Топография излома (а) и структура шлифа поверхности (б) композита импактный алмаз–связка (Fe-20%Ti)

Литература

1. Афанасьев, В.П. Попигайские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий / В.П. Афанасьев, Н.П. Похиленко // *Иноватика и экспертиза*. – 2013. – Вып. 1(10). – С. 8–15.
2. Афанасьев, В.П. Минералогические и технологические свойства импактных алмазов Попигайской астроблемы / В.П. Афанасьев, Н.П. Похиленко // *Десятая Международ. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология»*. – Москва, Троицк, 2016. – С. 42.
3. *Инструменты из сверхтвёрдых материалов* / под. ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. –608 с.
4. Витязь, П.А. Синтез наноструктурного алмаз-лонсдейлитного инструментального композита для абразивной обработки / П.А. Витязь, В.Т. Сенють, В.И. Жорник и др. // *Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр.* – Мн. : ОИМ НАН Беларуси, 2019. – Вып. 8. – С. 352–356.
5. Верещагин, В.А. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия / В.А. Верещагин, В.В. Журавлев. – Мн. : Наука и техника, 1991. – 208 с.

6. Ковалева, С.А. Применение атомно-силовой микроскопии для изучения структуры и морфологии механокомпозитов и металлических цементов на их основе / С.А. Ковалева, П.А. Витязь, А.И. Анчаров и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2009. – Т. 17. – Вып. 6. – С. 603–610.

*Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н.,
Гвоздев А.Е.* Тульский государственный педагогический
университет им. Л.Н. Толстого, Тула,
Колмаков А.Г. ИМЕТ РАН, Москва, Россия
Хейфец М.Л. Институт прикладной физики НАН Беларуси,
Минск, Беларусь
Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Институт сверхтвердых
материалов им В.Н.Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПРИГРАНИЧНЫХ ЗОН БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ

Изучены фазовые и структурные превращения, происходящие в приграничных зонах непрерывнолитых биметаллов 12Х18Н10Т + Ст3 и 12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т и их влияние на прочностные свойства биметаллического соединения. Установлено, что на формирование приграничных зон и свойств рассматриваемых биметаллов определяющую роль оказывает взаимная диффузия С, Cr, Ni. Выявлены четыре зоны с различным содержанием легирующих элементов: 1) зона, соответствующая химическому составу плакирующего слоя из 12Х18Н10Т; 2) зона постепенного снижения содержания Cr и Ni; 3) зона, граничащая с основным слоем и содержащая незначительное количество Cr и Ni; 4) зона основного слоя из Ст3. Глубина, на которую диффундируют в Ст3 Cr и Ni, составляет 30–50 мкм, а ширина приграничной зоны в 12Х18Н10Т: 130 мкм - для двухслойного композита и до 700 мкм – для трехслойного. Непосредственно около приграничной зоны переменного состава металла, со стороны Ст3, наблюдается перлитная полоска шириной до 0,1 мм. Фазовые и структурные превращения, происходящие в приграничной зоне, обусловлены воздействием высоких

температур при получении биметалла и его последующей термической обработкой. Вследствие этого, размер и структура приграничных зон биметалла в определенных пределах может регулироваться за счет изменения технологических и конструктивных параметров (длина кристаллизатора, расстояние между двумя кристаллизаторами) устройства непрерывной разливки [1].

При формировании трехслойного слитка в первую очередь происходит кристаллизация Ст3, затем на закристаллизовавшийся слиток подается жидкая нержавеющая сталь. При формировании двухслойной заготовки очередность кристаллизации меняется – на закристаллизовавшуюся нержавеющую сталь подается жидкий металл основного слоя. Ст3 имеет более высокую температуру плавления по сравнению с 12Х18Н10Т. Поэтому при получении трехслойного композита перегрев жидкого металла плакирующего слоя 12Х18Н10Т по сравнению с основным оказывается значительно меньше, чем при получении двухслойного слитка и, соответственно, ширина перемешанного слоя в 2–3 раза уже. Однако, при значительной скорости разливки поверхность внутреннего слитка в момент подачи плакирующего металла может иметь достаточно высокую температуру, что может приводить к значительному подплавлению углеродистой стали и размеры приграничных зон в двух и трехслойных слитках оказываются сравнимы. В трехслойном слитке также наблюдается появление по границам зерен Ст3 пластинчатого перлита и троостита. Это, по-видимому, связано с взаимодействием жидкого и твердого металлов и может рассматриваться как частный случай проявления эффекта Ребиндера – адсорбционного понижения прочности твердых тел жидким расплавом. Расклинивание границ зерен адсорбционно активным жидким металлом наблюдается если жидкий металл имеет более низкую температуру плавления, чем твердый, и лишь при вполне определенной величине растягивающих напряжений. Оба положения соблюдаются в случае получения трехслойной заготовки. При получении двухслойной заготовки этот эффект не возникает. После прокатки трехслойной заготовки на лист толщиной 1–4,7 мм, отрицательного влияния полос металла переменного состава не обнаружено. Очевидно, при нагреве заготовки под прокатку произошла диффузия углерода и легирующих элементов из полос металла с переменным составом в основной – Ст3, усреднившая состав перемешанного металла и прилегающей к нему Ст3.

Таким образом, показано, что изменения очередности заливки основного и плакирующего металлов при получении двух и трехслойных слитков приводит к некоторым отличиям в строении приграничных зон, но в обоих случаях достигается хорошее сцепление компонентов уже в литом состоянии за счет пограничного жидкофазного перемешивания контактируемых металлов и развития диффузионных процессов.

Дальнейшие технологические операции (нагрев под закалку, пластическая деформация), сопровождаемые также диффузионными процессами, обеспечивают расширение приграничных зон и способствуют повышению прочности сцепления контактируемых металлов. Результаты испытаний разрывных образцов от двух и трехслойных биметаллов показали, что прочностные и пластические свойства биметалла достаточно высоки и удовлетворяют техническим условиям на изделия. При этом разрушение образцов происходило не в зоне контакта металлов, а в материале покрытия из 12Х18Н10Т.

Литература

1. Сергеев, Н.Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных среда / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2018. – 430 с.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00556 и государственного задания №11.6682.2017/8.9

Сёмин Е.В. Белорусский государственный аграрный технический университет,
Лойко В.А., Ивашко В.С. Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ НА СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕТАЛЛА В ПОКРЫТИИ

Перспективным направлением решения задач восстановления и упрочнения прецизионных деталей автотракторной техники является нанесение износостойких, антифрикционных покрытий строго кон-

тролируемой толщины с жестким допуском на отклонение от ее равномерности по упрочняемой (восстанавливаемой) поверхности. При этом высота микро- и макронеровностей поверхности должна остаться в пределах класса исходной шероховатости, а температура в процессе упрочнения не должна превышать температуру отпуска низколегированных цементируемых сталей, из которых эти детали, как правило, изготавливают. В этом случае не потребуются последующие термическая и дорогостоящая механическая обработки деталей.

Наиболее перспективным методом решения этой задачи является использование PVD-процессов, в частности вакуумно-плазменной технологии нанесения многослойных износостойких композиций, включающих твердый слой на основе фаз внедрения переходных металлов IVa-VIa групп Периодической системы элементов, которые отличаются: высокой твердостью, термической и химической устойчивостью, высокой адгезией и малым коэффициентом трения по углеродистой стали [1]. Исключение из процесса формирования слоя дисперсных и макрочастиц основного металла покрытия достигается путем создания новых конструкций электродуговых испарителей и вспомогательных устройств [2] одновременно со снижением скорости нанесения покрытия от 2 до 10 раз, что не всегда приемлемо.

Формирование капельных частиц связано с катодными теплофизическими процессами вакуумной дуги испарителя при перемещении катодных пятен по локально расплавленной поверхности под ними, зависит от количества подводимой энергии, т.е. ~~Максимальный~~ ток, проходящий через катодное пятно, при котором возможно горение дуги [3], связан с теплофизическими константами материала катода соотношением:

$$I_K = 2,5 \cdot 10^4 \cdot T_K \cdot \sqrt{\lambda_T},$$

где T_K – температура кипения металла катода; λ_T – коэффициент теплопроводности.

Если ток больше, образуется несколько катодных пятен и тепловая нагрузка на поверхность катода возрастает, следовательно, увеличивается глубина проплавления поверхности катода и образование капель [2].

Поэтому представляется целесообразным использовать тугоплавкие материалы в качестве исходного металла покрытия, максимально улучшить теплоотвод от поверхности катода и отработать

технология с целью минимизации содержания и размеров частиц металла.

Установлено, что повышение тока дуги приводит к существенному росту содержания включений металла как в нитридтитановом, так и в карбонитрид-титановом покрытии, одновременно увеличивается доля более крупных включений. Это объясняется увеличением размеров расплавленной зоны в районе катодного пятна вследствие повышения плотности энергии в них при неизменной интенсивности теплоотвода.

Следует отметить, что при близких значениях содержания включений в нитридном и карбонитридном покрытиях (15 и 12% соответственно) размеры включений в последних существенно меньше при любых токах дуги. В карбонитридных покрытиях преобладают относительно мелкие 0,1–2,0 мкм включения, в то время как в нитридных – 4–8 мкм.

С увеличением давления реакционной парогазовой смеси содержание включений экстенсивно уменьшается в диапазоне 10^{-3} – 10^{-2} Па в связи с созданием противодействия на расплавленную зону под катодным пятном, затем в диапазоне 10^{-2} – 10^{-1} Па интенсивно падает в связи с образованием тонкой пленки карбонитридов на рабочей поверхности катода и последующим ее ростом, повышением ее дугостойкости, скорости перемещения катодных пятен, уменьшением плотности на поверхности.

Проведенными исследованиями показана возможность существенного уменьшения содержания включений металла технологическими методами и получены экспериментальные зависимости от основных технологических параметров.

Литература

1. Лафферти, Дж. Вакуумные дуги / Дж. Лафферти; под ред. В.И. Раховского. – М. : Мир, 1982. – 428 с.
2. Лойко, В. А. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве / В. А. Лойко и др. – Мн. : БГАТУ, 2008. – 192 с.
3. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.

Соломахо В.Л. Белорусский национальный
технический университет
Цитович Б.В. Белорусский Государственный институт
повышения квалификации и переподготовки кадров
по стандартизации, метрологии и управлению
качеством. Минск, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Для традиционных технологий обработки деталей в справочниках конструкторов есть значительное число рекомендаций по назначению требований к микрогеометрии их поверхностей, связанных с эксплуатационными требованиями. Кроме того, конструкторам практически всегда доступна документация уже производимых аналогов выполняемой разработки, откуда можно позаимствовать назначенные требования к микрогеометрии поверхностей. Однако следует учитывать некоторые особенности нормирования таких требований.

1. Большинство рекомендаций по нормированию требований к микрогеометрии сопрягаемых поверхностей в типовых сопряжениях изделий относятся к поверхностям, полученным традиционными методами обработки (срезанием слоя материала).

2. Нормирование требований к микрогеометрии поверхностей чаще всего ограничивалось назначением высотных параметров шероховатости поверхностей (R_a или R_z).

Нормирование требований к шероховатости поверхностей, получаемых традиционными методами обработки по аналогии довольно рационально, поскольку для таких поверхностей характерны довольно устойчивые соотношения между высотными и шаговыми параметрами шероховатости поверхностей и относительной опорной длиной профиля. Таким образом, назначение одного из упомянутых высотных параметров шероховатости в какой-то мере было равноценно одновременному выбору базовой длины и нормированию шаговых параметров и относительной опорной длиной профиля. Для обработки методами тонкого пластического деформирования (обкатка роликами, раскатка, дорнирование и др.) ситуация принципиально менялась, хотя разработчики на это практически не обращали внимания. Сегодня,

когда в производство «ворвались» новые технологии аддитивного получения функционально важных поверхностей, включая печать деталей на 3D-принтерах, следует пересмотреть подходы к нормированию микрогеометрии поверхностей.

Главной отличительной особенностью «новых» поверхностей является отсутствие взаимной зависимости между высотными и шаговыми параметрами шероховатости поверхностей, базовой длиной и относительной опорной длиной профиля. Это означает, что каждый из параметров надо выбирать автономно, а их нормы назначать исходя из требований к функционированию деталей.

Рекомендации, связывающие параметры шероховатости поверхностей и требования к функционированию деталей приведены в справочниках конструкторов, примером чего может быть табл. 1. Действующий в СНГ стандарт, устанавливает характеристики и шесть параметров шероховатости поверхностей (ГОСТ 2789), которые использованы в таблице. Есть стандарты, которые нормируют значительно большее число параметров шероховатости поверхностей, причём контроль этих параметров обеспечен выпускаемыми средствами измерений.

Таблица 1 – Эксплуатационные свойства поверхности и обеспечивающая их номенклатура параметров и характеристик шероховатости

Эксплуатационное свойство поверхности	Параметры шероховатости, определяющие эксплуатационное					
	Ra	Rz	$R_{\text{свойство max}}$	S_m	S	tp
Износоустойчивость при всех видах трения	+	+				+
Виброустойчивость	+	+		+	+	
Контактная жесткость	+	+				+
Прочность соединения	+	+				
Прочность при циклических нагрузках			+	+	+	
Герметичность соединений	+	+	+			+
Соппротивление в волноводах	+			+	+	

Не следует также забывать, что действующий стандарт, устанавливающий характеристики и параметры шероховатости поверхностей (ГОСТ 2789), позволяет не только независимо нормировать высотные и шаговые параметры шероховатости поверхностей, а

также относительную опорную длину профиля, но и назначать для любой из выбранных норм свою базовую длину, если в том будет необходимость.

Отсутствие в учебной литературе и справочниках конкретных рекомендаций по нормированию параметров шероховатости поверхностей и выбору относительной опорной длины профиля делает этот процесс довольно сложным. Можно предполагать, что разработка необходимых рекомендаций будет осуществляться вместе с широким внедрением соответствующих технологий. Возможен пересмотр номенклатуры нормируемых параметров в сторону её увеличения. Для разработки рекомендаций понадобится выполнение исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с внедрением новых технологий в перспективные изделия.

Тимофеев С.С., Воскобойников Д.Г., Колесник М.А.
Український державний університет
залізничного транспорту, Харків, Україна

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ

На сьогоднішній час, залишаються не вивченими питання комплексного впливу параметрів процесу різання на якість поверхневого шару, точність обробки і експлуатаційні властивості деталей. Численні варіанти виконання операцій механічної обробки розподільних валів вимагають знаходження спільних рішень вищезазначених проблем, що відносяться до нежорстких двигунів. Однією з головних проблем, що виникають при виготовленні та ремонті розподільних валів, є те, що цей вал викривляється не лише в процесі обробки, але і після її завершення, тобто вал, що відповідав усім вимогам і минулий технологічний контроль, через певний інтервал часу деформується. При ремонті деталей газоз-подільного механізму двигуна внутрішнього згоряння певну складність являє відновлення кулачків розподільного валу. Оскільки вал в двигуні встановлюється на опори, подібне викривлення валу призводить до збільшення вібрацій, навантажень на опори, їх швидкого зносу і, як наслідок, до зниження якості роботи двигуна.

Основною причиною деформації є перерозподіл технологічних залишкових напруг і спадкових напруг заготовки при видаленні припусків і напруг від температурно-силового впливу обробного інструменту, причому, як правило, напруги перерозподіляються нерівномірно.

Провівши аналіз способів відновлення кулачків розподільних валів, їх переваг і недоліків, а також умов роботи пари кулачок - штовхач, можна стверджувати, що в даний час немає універсального способу відновлення, який міг би одночасно поєднати в собі високу продуктивність, економічність, а також можливість забезпечити високу зносостійкість кулачка і сполученого з ним штовхача.

Вимога забезпечення високої зносостійкості пари кулачок - штовхач набуває особливої актуальності у зв'язку з тим, що в даний час зростає енергонасиченість ДВЗ за рахунок підвищення частоти обертання колінчастого валу. При цьому на клапан, метою гасіння інерційних сил, встановлюють більш потужні пружини, які при малих обертах розподільного валу ведуть до зростання контактних напружень в кулачку і штовхачі, що негативно позначається на їх зносостійкості.

Сучасні універсальні технології відновлення розподільних валів транспортних двигунів, дозволяють підвищити експлуатаційний ресурс відновленого валу, забезпечити екологічну чистоту процесу відновлення, знизити собівартість і трудомісткість ремонту, забезпечити високу зносостійкість пари кулачок - штовхач.

Тимофєєва Л.А., Букін Р.В., Титар Д.М.
Український державний університет
залізничного транспорту, Харків, Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ ПРИ РЕНОВАЦІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Технологія виготовлення литих колінчастих валів, яка використовується у наш час у промисловості, забезпечує заданий рівень міцності матеріалу валів, однак у процесі експлуатації відзначається ступінчасте зношування шийок валів, що викликає нерівномірний

розподіл навантажень по довжині вала, зародження втомних тріщин й руйнування валів. Аналіз характеру зношування й руйнування колінчастих валів дозволив встановити, що основними показниками, які характеризують працездатність валів, є зносостійкість поверхні їх шийок та опір втомі.

Перспективою розвитку та застосування способів зміцнення й нанесення зносостійких покриттів є їх відповідність задовільному рівню експлуатаційних характеристик трибосистем з прийнятою технологічністю, ремонтпридатність й економічністю процесів виготовлення та ремонту деталей.

Таким чином, для підвищення працездатності при відновленні колінчастих валів, пропонується застосування комплексних технологій, які включають термічну обробку в поєднанні зі способами, що забезпечують підвищення зносостійкості поверхні та навантаження задироутворення при малому значенні коефіцієнту тертя. Використання захисних покриттів при виготовленні й реновації деталей машин і механізмів висуває вимоги до покриттів та технологій їх нанесення, у необхідності забезпечення одержання поверхневого шару зі стійкими фізико-механічними властивостями.

Оцінка якості технології нанесення захисних покриттів базується на сучасних технологічних методах й апаратурному забезпеченні, що дозволяють з високою точністю та надійністю оцінити короткочасну міцність, міцність на розтягання й згин, міцність від утомленості, визначення корозії покриттів тощо.

Було розроблено комплекс заходів з вибору технології нанесення покриттів та оцінки їх якості, який включає структурну модель, що базується на алгоритмі формалізованого вибору покриттів й технологій їх нанесення, а для оцінки основних факторів, що впливають на якісні характеристики одержуваного покриття, запропоновано використовувати причинно-наслідкову діаграму (рис. 1), що дозволяє проаналізувати фізико-механічні властивості цього покриття. Системний підхід в оцінці якості та технологічній ефективності нанесення зміцнюючого та антифрикційного покриттів в одному технологічному циклі дозволяє зробити висновок, що використання комплексної технології при відновленні таких важливих й складних деталей, як колінчастий вал, дозволить значно підвищити зносостійкість, навантаження задироутворення та забезпечить низький коефіцієнт тертя триботехнічного з'єднання шийка–вкладиш.

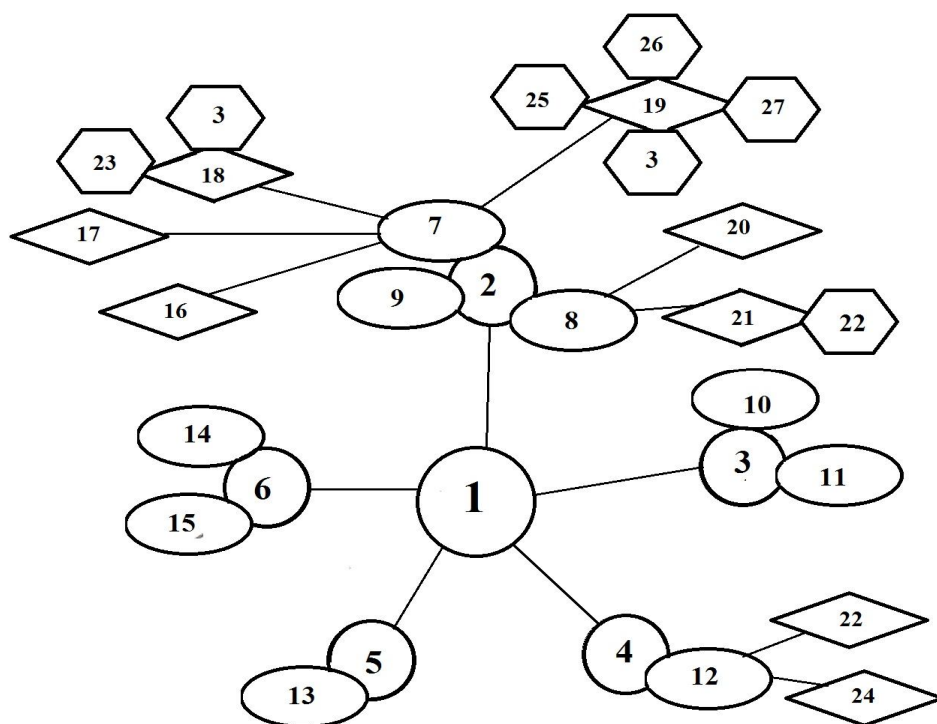


Рис. 1 – Причинно-наслідкова діаграма визначення основних факторів, що впливають на якість нанесеного покриття:

2 – властивості покриттів; 3 – залишкові напруження; 4 – зносостійкість та характеристики тертя; 5 – міцність від утомленості; 6 – характеристики структури; 7 – механічні властивості; 8 – фізичні властивості; 9 – захисні властивості; 10 – розподіл напружень; 11 – значення напружень; 12 – мікротвердість; 13 – напруження стискання; 14 – краплі; 15 – вирости; 16 – модуль пружності; 17 – коефіцієнт Пуассона; 18 – міцність покриття при розтягуванні; 19 – міцність зчеплення покриття з основою; 20 – щільність; 21 – пористість; 22 – пори; 23 – розтріскування; 24 – фактори процесу; 25 – відшарування; 26 – підготовка поверхні; 27 – сумісність матеріалу основи й покриття

Трембач Б. О., Гринь О.Г. Донбаська державна машинобудівна академія, ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», Краматорськ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАВАННЯ МІДІ (Cu) НА ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ СИСТЕМИ Fe-C-Cr-Ti-V-Al

Конкурентоспроможність машин що експлуатуються на гірничозбагачувальних комбінатах та підприємств зайнятих переробкою твердих матеріалів крім ціни та енергоспоживання, визначається також такими показниками, як продуктивність та надійність (технологічні перерви або аварійні зупинки на плановий та аварійний ремонт).

Останнє залежить від ресурсу деталей, що мають в першу чергу короткий період експлуатації, якими є деталі підвернені інтенсивному зносу.

Стійкість до стирання може бути підвищена за допомогою відповідного вибору матеріалу. Проте, виготовлення інструменту з зносостійкого сплаву в більшості випадків не є доцільним, через високу вартість, а також ускладнення подальшої процесу обробки. Крім того, здебільшого лише частина поверхні піддається деструкції. У цьому випадку більш економічним та технологічним є використання зносостійкого покриття місцево. Одним з дуже ефективних механізмів підвищення зносостійкості є нанесення функціональної поверхні на відповідний матеріал за допомогою наплавлення [1], серед яких набуває все більшого поширення наплавлення самозахисним порошковим дротом (FCAW-S) [2]. Останнє має наступні переваги: має високу продуктивність, гарантує високу якість наплавленого металу, потребує нескладного обладнання, що особливо важливо для відновлення робочих поверхонь, що працюють в важких умовах.

Важкі умови експлуатації, коли матеріал піддається комплексному впливу: механічного з боку твердих абразивних частинок і хімічного (корозійного) з боку середовища, сприяють прискореному зносу. Дані умови вимагають від матеріалів, що використовуються поєднання високих механічних властивостей та корозійної стійкості. Матеріали, що застосовуються при наплавленні зносостійкими сплавами в більшості випадків містять дорогі (Mo, Nb, V) та дефіцитні (Ni) легуючі елементи, що істотно підвищує їх вартість. За умови певного дефіциту матеріальних та енергетичних ресурсів виникає необхідність розробки нових матеріалів, що містять обмежену кількість елементів які не виробляються насировинній базі України. В Україні добувають в промислових обсягах марганець, хром, мідь, алюміній та титан. У цьому випадку великий інтерес викликають такі елементи як хром, титан, та мідь. Перші слугують активними елементами, що утворюють дуже тверді зміцнюючі частинки (карбіди), що має істотно підвищувати абразивну зносостійкість наплавленого металу, вплив на абразивну зносостійкість яких вивчено в багатьох роботах.

Однак неминуче, що такі сталі будуть все більш сприйнятливі до локальної корозії через наявність численних карбідних виділень [3]. Для підвищення корозійної стійкості, та підвищення механічних

властивостей сталі легують замість нікелю міддю. ПОВЫШЕННАЯ коррозійна стійкість за счет додавання міді в розробаний сплав обумовлена поступенним обогаченням міді на поверхності. Механізм, оснований на розкладанні на ранній стадії корозії, аналогічний механізмові повторного осадження Cu [4]. Тому дослідження додавання міді до систем сталей використовуються для зміцнення та відновлення поверхонь деталей що піддаються абразивно-коррозійній та гідроабразивній деструкції викликає великий інтерес. Сучасні дослідники вважають, що однією з важливіших показників що характеризують стійкість проти абразивного зносу є твердість, а саме відношення твердості сталі до твердості абразиву.

Метою роботи, є визначення впливу додавання міді (Cu) на твердість наплавленого металу системи Fe-C-Cr-Ti-V, що не піддається термічній обробці після наплавлення.

Наплавлення здійснювали на зворотній полярності автоматом А 874 від джерела живлення з жорсткою зовнішньою характеристикою на режимі $I_{зв} = 320-360$ А, $U_d = 28-30$ В, $V_{зв} = 18$ м/ч, виліт дроту 30 мм. Для визначення твердості наплавленого металу у 3 шари на пластини з низьколегованої сталі (Ст3сп) товщиною 8 мм. Типовий наплавлений метал містив: 0,78–0,89% С; 2,88–3,72% Cr; 0,63–0,81% Ti; 0,4–0,59% V; 0,86–0,99% Si; 1,09–1,47% Mn; 0,36–0,54% Al, $x\%$ Cu, Fe – інше. Для вимірювання твердості нанесеного покриття використовувався твердомір ТК-2М (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив додавання до наплавленого металу системи Fe-C-Cr-Ti-V на твердість

	Вміст міді Cu				
	1,47	2,12	2,99	4,15	4,85
HRCe	48,00	58,00	57,00	52,00	51,00
HRCp	50,00	54,70	57,40	54,60	49,40

Для отримання математичної моделі та графіку залежності було виконано математичне моделювання у програмі Minitab. Графік залежності та математична модель наведені на рис. 1.

$$HRC = -2,70851 \cdot Cu^2 + 16,9563 \cdot Cu + 30,8837 \quad (1)$$

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що додавання міді позитивно впливає на твердість сталі, тому є доцільним її додавання до сталі.

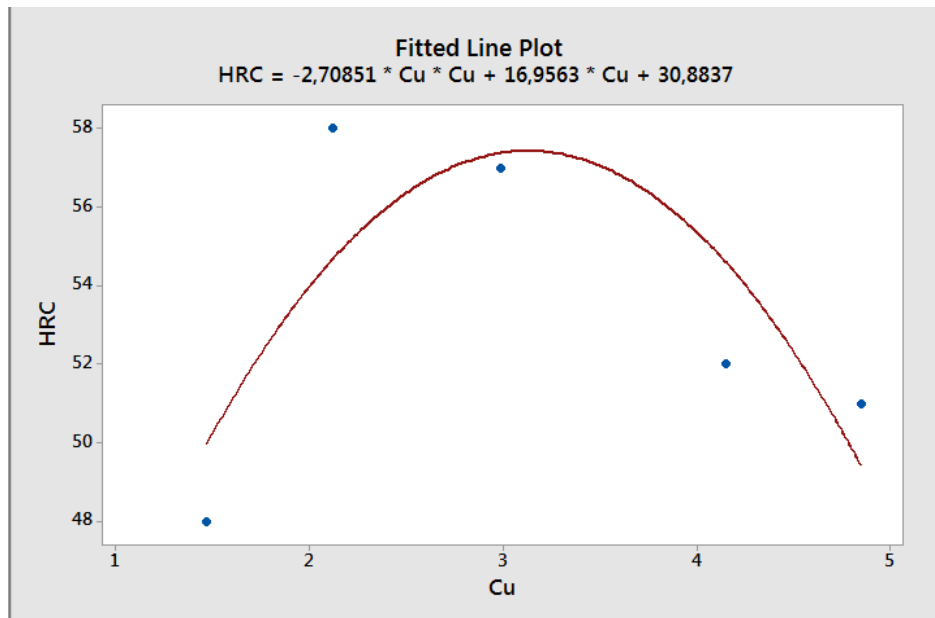


Рис. 1 – Графік залежності твердості сталі системи Fe-C-Cr-Ti-V від вмісту міді

Висновки. Розробка нових зносостійких сплавів, що містять незначну кількість кошовних компонентів або дефіцитних елементів, має велике значення та потребує уваги сучасних розробників зварювальних матеріалів. При цьому великий інтерес викликає додавання до існуючих систем міді.

Мідь підвищує прогартованість сталі, та сприяє підвищенню твердості при його додаванні до 3–4%.

Література

1. EN 14700: Welding consumables – Welding consumables for hard-facing, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
2. Гринь, А.Г. Перспективные направления разработки самозащитных порошковых проволок с экзотермическими смесями / А.Г. Гринь, Б.А. Трембач, С.В. Жариков, И.А. Трембач // Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє: Тези студ. доп. – К. : Міжнарод. Асоц. «Зварювання», 2018 – С. 30–31.
3. Anantha, K.H. Correlative microstructure analysis and in situ corrosion study of AISI 420 martensitic stainless steel for plastic molding applications / K.H. Anantha et al. // J. Electrochem. Soc. – 2017. – 164. – С 85–С 93.
4. Pardo, A. Influence of Cu and Sn content in the corrosion of AISI 304 and 316 stainless steels in H₂SO₄ / A. Pardo et al. // Corros. Sci. – 2006. – 48. – P. 1075–1092.

ВПЛИВ НАКЛЕПУ ПРИ ФІНІШНІЙ ОБРОБЦІ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ РОБОЧОГО ШАРУ КАНАЛУ ХВИЛЕВОДІВ

Більшість хвилеводів S-діапазону виготовляють з досить м'яких металів: алюмінію і латуні. При фінішній обробці каналу хвилеводів застосовуються різноманітні методи, які забезпечують різний рівень шорсткості робочої токонесучої поверхні, особливо в важкодоступних місцях. Однак більшість із цих методів одночасно наводять різний ступінь наклепу на глибині зміцненого шару 0,02–0,10 мм. Пластична деформація і наклеп завжди підвищують питомий електроопір металів і сплавів (рис. 1, а), при цьому зменшуючи їх електропровідність. При наклепі чистих металів електропровідність зменшується на 2–6%, а для сплавів – до 25% [1].

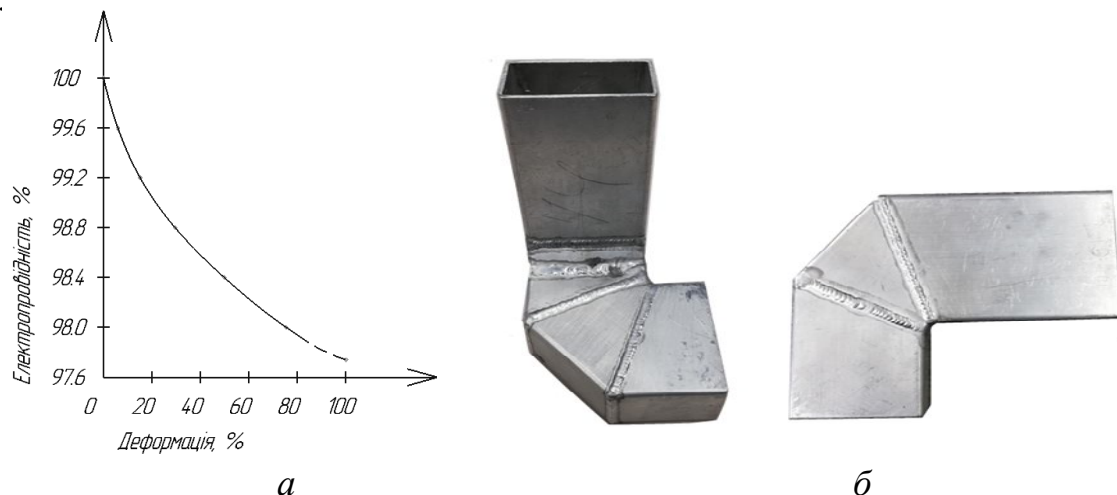


Рис. 1 – Вплив наклепу на питому електропровідність міді (а) [1] та типові кутові хвилеводні переходи (б)

Важливим параметром, що характеризує поширення хвилі в хвилеводі, є коефіцієнт загасання. Значний вплив на коефіцієнт загасання при незмінній частоті хвилі і перетині хвилеводу, без урахування шорсткості, має тільки електропровідність. Велика щільність струмів на внутрішніх стінках вимагає високої електропровідності робочого поверхневого шару каналу. Глибина проникнення струмів високої частоти S-діапазону для хвилеводу з алюмінію становить 1,9–1,5 мкм, а латуні – 2,8–2,3 мкм. В даний час є достатня

кількість досліджень, які свідчать про позитивний вплив поверхневого наклепу на збільшення міцності, зносостійкості, твердості тощо. Однак залишилось не вивченим питання впливу наклепу на електропровідність тонкого токонесучого шару поверхонь каналу хвилеводів, при глибині проникнення струму високої частоти, меншої за глибину наклепу.

Об'єктом дослідження були конструктивні елементи натурних хвилеводів, які мають найбільше застосування і труднощі обробки – зварні та паяні кутові переходи (рис. 1, б). Для виготовлення зразків використовувались хвилеводні труби з алюмінію АД0 і латуні Л96 перетином 72×34 мм з шорсткістю каналу: повздовжньою $Ra_{новз} = 0,25–0,35$ мкм і поперечною $Ra_{non} = 0,55–0,65$ мкм, які розрізали на секції і поетапно зварювали або запаювали.

Фінішну обробку зразків проводили поетапно після рихтування шва і біляшовних, деформованих під час зварювання, поверхонь внутрішнього каналу до усунення дефектів зварювання (пайки) і утворення однорідної поверхні з плавним переходом до основної частини хвилеводної труби. Для дослідження були використані наступні методи обробки каналу: обробка полімерно-абразивною йоржиковою щіткою, гідроабразивне прокачування, обробка скляними кульками. Інструмент в цих трьох дослідках мав одну й ту саму зернистість (F120), режими обробки були оптимальними для кожного методу, забезпечуючи максимальну продуктивність. Електропровідність вимірювали на внутрішній поверхні каналу необробленої хвилеводної труби і на зразках після фінішної обробки; для цього їх розрізали. Для перевірки електропровідності використовували вихреструменевий вимірювач «Константа К6».

За результатами вимірювання зразків, було встановлено, що обробка алюмінієвих і латунних хвилеводів полімерно-абразивною йоржиковою щіткою і гідроабразивне прокачування викликали зменшення електропровідності менше ніж 1%. У той же час обробка скляними кульками приводила до зменшення електропровідності до 5%, що в свою чергу збільшувало коефіцієнт загасання на 2–3%. Це було пов'язано з більшим ступенем наклепу поверхні каналу.

Література

1. Барсуков, С.Н. Электромагнитные волны в направляющих структурах: уч. пособие / С.Н. Барсуков. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2007 – 59 с.

Уваров В.А. Херсонська філія Національного
університету кораблебудування імені
адмірала Макарова, Херсон
Громовий О.А. Державний університет «Житомирська
політехніка», Житомир, Україна

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПІДШИПНИКІВ ЗА РАХУНОК ПЛАЗМОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Полімерні речовини проникли в усі сфери людської діяльності – техніку, машинобудування, судноремонт, суднобудування. Щодня ми стикаємося з різними пластмасами, резинами, синтетичними волокнами. Вони володіють багатьма корисними властивостями: вони стійкі до агресивних середовищ, хороші діелектрики і утеплювачі. Деякі полімери мають високу стійкість до низьких температур, інші – водовідштовхувальні властивості і так далі.

У опорах гребних валів та дейдвудних ущільненнях річних та морських суден широко використовуються гумометалевих підшипники ковзання та ущільнення манжетного типу, у гідроциліндрах керування кермом і головними двигунами – манжети та гумові ущільнення, вимоги до яких регламентовані стандартами напрямків підвищення працездатності опор з гумометалевими елементами – це використання поверхнево модифікованої гуми, що дозволяє створити клас гумових матеріалів «без тертя» – антифрикційні еластомери (АЕ), які отримують шляхом плазмохімічної обробки готових гумовотехнічних виробів (ГУТВ). В результаті на поверхні ГУТВ виникає тонка полімерна захисна плівка, хімічно пов'язана з основною поверхнею. Вона надає гумі нові експлуатаційні властивості: коефіцієнт тертя у парі гума-метал знижується у 5–10 разів, значно підвищується зносостійкість гуми та гарантійний строк її зберігання. На відміну від звичайних гумових матеріалів АЕ при довготривалому контакті з металами не викликають їх корозії. Для поглибленого вивчення впливу експлуатаційних умов на роботу АЕ декілька дослідних об'єктів було встановлено на судна морського флоту.

Гумометалеві підшипники оброблювались в плазмі тліючого розряду у середовищі фторорганічних сполук. В результаті плазмо-обробки на поверхні гуми утворюється фторополімерна плівка, що

надає гумі антифрикційних властивостей. Отриманий у плазмі антифрикційний шар товщиною до 10^2 нм потім потовщується сполученням фторопласту 32 з дисульфідом молібдену (MoS_2) до 20–25 мкм, причому, об’ємний склад покриття поступово збільшується від 5 до 25 мкм у напрямі підвищенні дії радіального навантаження, тобто, у напрямі зростання найбільш навантажених сегментів підшипника.

Були також вирізані зразки гуми (товщиною 2 мм) з підшипників (з ділянок розвитку «крайового» ефекту). При тиску 0,2 МПа і швидкості ковзання 0,011 м/с, які характеризують пускове тертя, досліджувалося тертя гуми по сталевій поверхні, що має шорсткість 0,4 мкм, без змащення (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати дослідження фрикційних властивостей модифікованих гумометалевих підшипників в режимі пускового тертя

Вимірюваний параметр	Напрацювання модифікованого підшипника, год. (проект судна)					Напрацювання, до модифікації,
	0 (усі проекти)	2717 (342)	3250 (342)	1850 (342MT)	3700 (342M)	год. 0
Коефіцієнт сухого тертя	0,45	0,49	0,62	0,94	1,10	1,75

Відомо, що для опор з жорсткими вимогами щодо радіальних зсувів валів, особливо, працюючих в умовах вібрації, з мінімальною кількістю пусків, зупинок і реверсів вала (відповідає роботі СПК на рейсових лініях: Херсон–Одеса).

Для забезпечення максимальної зносостійкості і поліпшення несучої і демпфуючої здатності сполучення вала рекомендують підшипник виконувати по посадці з гарантованим натягом, що не перевищує граничних об’ємних пружних деформацій втулки (гумового облицювання). Однак при виборі мінімальних настановних зазорів варіант сполучення «з гарантованим натягом» в ряді випадків (контакт з валами з вуглецевих конструкційних сталей) не забезпечує надійність вузла тертя, так як збільшення площі контакту гуми з металом викликає і збільшення площі корозії валу, що при важких режимах роботи пускового тертя різко скорочує термін служби гумометалевих підшипників. Тому при випробуваннях гумометалевих підшип-

ників, встановлених в кормових кронштейнах СПК, нами була зроблена спроба об'єднати технічне рішення і використання АЕ.

У той час як рідинне тертя теоретично і експериментально досить добре вивчено, в області граничного і напіврідинного тертя залишається ще багато невирішених завдань. Спробуємо дати роздільну оцінку кожного з факторів на роботу підшипників.

Тим часом, фрикційні властивості ПТФЕ можуть бути значно поліпшені введенням в нього таких добавок, як дисульфід молібдену, графіт і ін. Експериментально також виявлено, що тонкі шари ПТФЕ володіють особливо низьким коефіцієнтом тертя (0,04–0,06) порівняно з його товстими шарами (0,18–0,30). Завдяки цьому в зоні тертя має місце позитивний градієнт рушійної міцності, так як сили зрізу на поверхні менше цих сил в обсязі матеріалу. Тому по аналогії і в нашому випадку підкладка з ПТФЕ товщиною до 10 нм нарощуваною композицією товщиною 5–25 мкм повинна забезпечувати зниження коефіцієнта тертя і інтенсивності зношування гумометалевих підшипників. Однак пояснення цього експериментального фактора вимагає подальших досліджень, оскільки крім вищевказаних причин пояснення наявного результату може бути виникнення плівки перенесення на вал і впровадження антифрикційної композиції в гумове облицювання в процесі зношування. Відомо, що гума на основі каучуку не терпить дотику з мінеральними маслами, нафтою. Ці речовини або їх складові, частини, що містяться в річковій і морській воді, є розчинниками гуми і навіть у порівняно невеликих кількостях розм'якшують її, викликають набухання, роблять липкою і знижують ступінь придатності до роботи.

Модифіковані гумометалевих підшипники цих недоліків позбавлені, оскільки нанесена на гумову частину захисна полімерна плівка містить фторопласт, стійкий до кислот, лугів, а також інших агресивних середовищ, і відрізняється низькою володіє досвід експлуатації модифікованих підшипників, після напрацювання в 1200–1700 год. в місцях розвитку «крайового ефекту» відбувається перехід антифрикційного шару в продукти зношування і оголюється гумове облицювання підшипника. Тому для підвищення хімічної стійкості облицювання при роботі в активних середовищах (морська вода, вода, при попаданні нафтопродуктів та ін.). Гумометалевий підшипник після плазмохімічної обробки необхідно піддавати обробці імпульсним магнітним полем,

що дозволило для гум марки 10677, що беруть участь в експерименті, підвищити маслостійкість на 18–40%, хімічну стійкість в морській воді на 27–42%, в дизельному паливі – на 5–8%. У той же самий час відомий спосіб обробки органічних і неорганічних речовин у обертальному або бігучому електромагнітному полі не дозволяє підвищити експлуатаційні властивості гумового облицювання підшипників без зниження фізико-механічних властивостей антифрикційного покриття, тому що вже у перші хвилини обробки антифрикційного покриття (фторопласту 40) межа міцності на розрив зменшується на 30%, твердість – на 20%, залишкове подовження при розриві – на 60%, що викликає втрату робочою поверхнею антифрикційних властивостей. Крім того, зростає твердість гум із суміші неполярних каучуків СКІ-3 і СКД. Імпульсний же режим обробки дозволяє уникнути зміни твердості антифрикційного покриття і гумового облицювання.

Федченко І.І., Грибанов М.В., Цап О.І.
Український державний університет
залізничного транспорту, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ТЕРТЯ

Підвищення довговічності і надійності деталей машин і механізмів, що працюють в умовах тертя і зношування, забезпечується: підбором пари тертя з мінімальним коефіцієнтом тертя, збільшенням твердості однієї або обох пов'язаних деталей, створенням на поверхні спеціальних захисних шарів з необхідними структурою і властивостями та ін.

З цієї точки зору необхідно більш детально розглянути формування поверхневого шару триботехнічного призначення.

Найбільш повну оцінку властивостей поверхневого шару, стосовно до конкретних умов роботи пари тертя, дають експлуатаційні випробування. Отримання характеристик експлуатаційних випробувань являє собою тривалий процес. До недоліків цих випробувань відноситься їх дорожнеча, складність вимірювань і необхідність ве-

ликої кількості спостережень. Тому для виявлення тенденцій впливу складу і структури поверхневого шару на тертя можуть використовуватися лабораторні випробування.

При лабораторних дослідженнях можна отримувати порівняно виробничі характеристики матеріалів покриття на знос в умовах, що імітують службу деталей в експлуатації, до яких відноситься тиск, швидкість, температура, вид і характер тертя. Для проведення лабораторних випробувань можуть бути використані машини тертя типу СМЦ і М-22М.

Для випробувань були вибрані контртіла діаметром 40 мм і товщиною 12 мм, і зразки прямолінійної форми 16 мм з площею робочої поверхні 0,5 см². На машинах тертя важко фіксацію моменту настання задирака станом поверхні тертя, тому в якості характеристики протизадирних властивостей поверхневих шарів була прийнята навантаження, при якій з'являються задирки і відбувається різке зростання величини моменту тертя. Критерієм зносостійкості служила втрата ваги досліджуваних зразків. Після кожного випробування визначали масовий знос контртіла і зразків зважуванням на аналітичних вагах з точністю до 10⁻⁴ м. Коефіцієнт тертя підраховували за формулою, згідно, і фіксували завантаження, при якій відбувається зміна моменту тертя. Відтворюваність експериментів перевірялася за критерієм Кохрена. При розробці нового напрямку в області хіміко-термічної обробки поверхні залізобуглецевих сплавів за базовий метод обробки був узятий процес парогазового насичення в атмосфері перегрітої водяної пари, тому порівняння пропонованого напрямку обробки проводилося в основному паротермічним оксидуванням залізобуглецевих сплавів, іншими традиційними методами поверхневого зміцнення. Перевірялася припрацювання, задиростійкість, зносостійкість, визначення коефіцієнта тертя. Результатом дослідження хіміко-термічної обробки з використанням насичує середовища перегрітої пари водного розчину солей, що має в своєму складі такі елементи як сірка, молібден, кисень, фосфор, дозволили зробити висновок наступне:

- в результаті застосування даної технології обробки, зменшилася значення коефіцієнта тертя оксидного шару заліза;
- збільшилася задиростійкість шару покриття, а як результат підвищилися експлуатаційні властивості деталей і вузлів машин і механізмів працюють в умовах тертя.

Отримані дані, дають підставу для використання запропонованого методу зміцнення в процесі відновлення працездатності деталей і вузлів машин і механізмів працюють в умовах тертя.

Фідровська Н.М. Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
Чернищенко О.В., Хурсенко С.О. Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ЛОБОВИНИ КРАНОВОГО БАРАБАНАУ

Для підвищення жорсткості конструкції шахтні барабани підсилюють кільцями і ребрами жорсткості, що не тільки збільшують їх вагу і ускладнюють технологію виготовлення, але і викликають значні місцеві напруження, які погіршують роботу барабана. Приймаємо, що лобовина являється круглою пластиною, яка навантажена по зовнішньому колу несиметричним тиском

$$P = F(r, \varphi), \quad (1)$$

де r – радіус пластини, φ – кут, який відраховується від вертикальної діаметральної лінії.

Прогини пластини будуть залежати від координати r і від кута φ і їх можна представити у вигляді [1] $w = (r, \varphi) = w \cos n\varphi$, де n – числа натурального ряду.

Рівняння повної потенційної енергії пластини на одиницю довжини вповодж радіуса r без урахування деформації зсуву

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{2} m_r \chi_r + \frac{1}{2} m_\varphi \chi_\varphi + m_{r\varphi} \chi_{r\varphi} - p_n(\varphi) \cos n\varphi w(r, \varphi) \right] r d\varphi \quad (2)$$

Зовнішнє навантаження лобовини барабану приймаємо за формулою [2]

$$p = \frac{T_0}{R} e^{-kf\varphi}, \quad (3)$$

де T_0 – натягнення канату, яке сходить з барабану, k – коефіцієнт, який враховує пружні і геометричні параметри канату і барабану [2]

$k = \frac{E_b d}{E_k \sqrt{R_b \delta}}$, f – коефіцієнт тертя канату і барабану, φ – кут намоту-

вання канату, R – зовнішній радіус лобовини, R_b – радіус обичайки барабану, E_b, E_k – відповідно модуль пружності барабану і канату, d – діаметр канату, δ – товщина обичайки.

Вирішуємо задачу за допомогою рівняння Ейлера варіаційної задачі. Отримуємо диференціальне рівняння 4-го ступеню

$$r^4 \frac{d^4 w}{dr^4} + 2r^3 \frac{d^3 w}{dr^3} - (1 + 2n^2) \frac{d^2 w}{dr^2} + (1 + 2n^2) \frac{dw}{dr} + n^2 (n^2 - 4) w = \frac{r^4 T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1)}{DR (k^2 f^2 + n^2)}. \quad (4)$$

Найбільш можлива деформації лобовини канатного барабана при $n = 2$. Загальне рішення рівняння (4) буде

$$y = C_1 e^{k_1 r} + e^{k_4 r} (C_2 \sin k_5 r + C_3 \cos k_5 r) + \frac{T_0 (e^{-2\pi k f} - 1) k f}{DR (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)}, \quad (5)$$

де

$$C_3 = \frac{T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1)}{DR \delta b_1 (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)} \left[1 - \left(1 - \frac{e^{a_1 R_c}}{e^{a_1 R}} \right) b_2 \right]; \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1}{e^{-\frac{a_1 R_c}{2}} \sin a_2 R_c - e^{-\frac{3a_1 R}{2}} e^{a_1 R_c} \sin a_2 R} \left[C_3 b_1 + \frac{T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1) (1 - e^{a_1 R_c} e^{-a_1 R})}{DR \delta (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)} \right]$$

$$C_1 = \frac{T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1)}{DR \delta e^{a_1 R} (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)} - e^{-\frac{3}{2} R} (C_2 \sin a_2 R + C_3 \cos a_2 R),$$

$$\text{де } b_1 = e^{-\frac{3a_1 R}{2}} e^{a_1 R_c} \cos a_2 R - e^{-\frac{a_1 R_c}{2}} \cos a_2 R_c, \quad b_2 = \frac{\sin a_2 R + \frac{a_2}{2} \cos a_2 R}{\sin a_2 R_c - e^{-a_1 R} e^{-\frac{a_1 R_c}{2}} \sin a_2 R}.$$

Отримане рішення для визначення деформації лобовини канатного барабана під дією канату, який намотується на оболонку барабана. Це дасть змогу провести розрахунки навантаженості лобовини і оцінити необхідність посилення її елементами жорсткості.

Література

1. Кан, С.Н. Строительная механика оболочек / С.Н. Кан. – М. : Машиностроение, 1966. – 508 с.

2. Фідровська, Н.М. Уточнена методика розрахунків канатних барабанів / Н.М. Фидровская // Машинобудування : зб. наук. пр. – Харків : Укр. інж.-пед. Акад., 2014. – Вип.13. – С. 37–41.

МЕТОДЫ ТЕКСТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КЛАССИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА

К «текстурированным» относят технические поверхности, отличающиеся наличием множества регулярно расположенных специальных геометрических микроэлементов (микро-: ямок и отверстий, выступов, валиков, канавок и пр.) достаточно точной формы и размеров, которые специально наносят для улучшения или обеспечения их новых функциональных свойств. Характеристика текстуры и ее функциональность определяются совокупностью основных геометрических характеристик микроэлементов – формой, размерами, плотностью и закономерностями распределения на поверхности. Интенсивно расширяется применение текстурированных поверхностей в трибологии, оптике, физике, биомедицине, энергетике, электронике, метрологии и др. В свою очередь это привело к развитию разнообразных методов и технологий текстурирования поверхностей деталей и инструментов, и даже материалов. Начиная с середины 1990-х годов резко возросло число публикаций по результатам исследований текстурирования поверхностей в разнообразных отраслях. Постоянное увеличение способов текстурирования обуславливает необходимость их систематизации и классификации, а также выбора методов оценки качества. Известно, что текстурированные поверхности геометрически текстурированных поверхностей можно подразделить на пять основных групп:

Аддитивные технологии (добавление (осаждение) материала) – текстура формируется методами химического или физического осаждения, в результате чего образуются нано- или микро-выступы различной формы.

Технологии с удалением материала: создание микро- ямок, углублений, отверстий, канавок и пр. путем локальных (точечных) методов удаления материала поверхностного слоя.

Технологии перераспределения материала: например, поверхностный слой пластически деформируется и перемещается из одного участка в другой, изменяя текстуру поверхности.

Совмещенные с основными формообразующими операциями при получении заготовок деталей.

Самоорганизующиеся методы текстурирования (при трении).

Аддитивные технологии. В отечественной литературе эти методы охватываются понятием дискретных покрытий. Для их осаждения модифицируются известные способы получения покрытий, а для получения микроэлементов текстуры (МЭТ) используют маски или формирующие экраны. К *технологиям химического осаждения* относят: – *конверсионные покрытия*, получаемые в результате химической реакции непосредственно на поверхности металла в результате химических или электрохимических реакций. К числу наиболее часто применяемых конверсионных покрытий относятся фосфатные, оксидные и хроматные; – *химическое осаждение покрытий из паровой фазы (CVD)* – газофазное осаждение. Изделие взаимодействует с одним или несколькими летучими прекурсорами, которые реагируют и разлагаются на подложке с образованием тонкой пленки. Микроэлементы текстуры имеют высоту от десятков нм до нескольких мкм, а поперечные размеры должны быть не менее нескольких микрометров. К недостаткам относятся: возможность текстурирования только мелких и средних деталей из-за ограниченных размеров камеры и использование токсичных газов; – *автокаталитическое осаждение* металлических покрытий на металлические или активированные металлом поверхности в растворах химического восстановления. Могут осаждаться медь, никель, железо, кобальт, серебро, золото, платина и палладий; – *электролитическое (гальваническое) осаждение* используется для получения металлических покрытий. Высота получаемых элементов варьируется от 800 нм до 20 мкм, а поперечные размеры от 20 до 1000 мкм. *Печать* для осаждения твердых частиц (проводящих полимеров, конструкционных полимеров, керамики и металлов) с образованием износостойких рельефов. Размеры микроэлементов варьируются от 5 до 900 мкм по высоте и от 20 до 200 мкм в поперечном направлении. Разрешение печати зависит от разрешения струйного принтера, диаметра частиц и характеристик материала; – *методы физического осаждения из паровой фазы (PVD)*. Способы CVD и PVD приемлемы как для мелкого, так и для крупного производства текстурированных изделий, для плоских или цилиндрических заготовок и более сложных; – *электроискровое легирование*; – *термическая имплантация* лазерным микроплакированием; – *лазерная наплавка*; – *плазменная наплавка*; – *газотермическое напыление* (валиков покрытий, сло-

ев покрытий в шахматном порядке и пр.); – *электроконтактное припекание порошков*.

Технологии текстурирования с удалением материала подразделяются на *высокотемпературные процессы* (лазерные технологии, электроэрозионные методы, электронно-лучевые или ионно-лучевые методы), *химические реакции* (травление) и *механические процессы* (шлифование, хонингование, ультразвуковая обработка и струйно-абразивная обработка). Лазерные технологии и химическое травление являются наиболее распространенными методами, используемыми для создания узорчатых поверхностей. Несмотря на влияние температуры на подложку (воздействие лазерного луча) или некоторые трудности в управлении процессом травления, эти методы позволяют формировать четко определенную геометрию непрерывных или прерывистых текстур: – *лазерное текстурирование* основано на процессе абляции (чрезмерном нагреве и расплавлении материала подложки) с удалением расплавленного материала из созданной микрокаверны. Требуемые текстуры получают прерыванием лазерного луча быстро вращающимся перфорированным диском; использованием узорной маски для расщепления луча, проецируемого на подложку; обработкой каждого элемент текстуры индивидуально на лазерных установках с ЧПУ; – *текстурирование электроэрозионной обработкой* используется для любых электропроводящих материалов (закаленная сталь, карбид вольфрама, сплавы) и непроводящих материалов (керамика). Существенными преимуществами являются: возможность получения микроэлементов сложной геометрии с острыми и внутренними углами с размерами менее 100 мкм; низкая шероховатость обработанных поверхностей (<100 нм); высокая точность (~1 мкм); отсутствие механических напряжений в заготовке при обработке. Применение ограничено низкой скоростью съема материала (100 мм³/мин); образованием зон термического влияния и «белых слоев»; длительная обработка для получения низкой шероховатости; – *текстурирование фокусированным ионным пучком* позволяет формировать небольшие ямки при точном расположении на поверхности. Основные преимущества: высокое разрешение; нет ограничений по материалам деталей; небольшая шероховатость поверхности, можно использовать для сглаживания поверхности ($Rq < 0,3$ нм для металлических сплавов); диаметр пятна ионного пучка, определяющего поперечный размер текстуры, может уменьшаться до 8 нм. Однако низкая скорость об-

работки ограничивает использование способа; – *текстурирование химическим травлением*. Формирование рельефа достигается с помощью маски или самоорганизацией твердых частиц или жидкостей для создания маски. Глубину текстуры можно контролировать, изменяя время травления, получаемая глубины текстуры от 0,5 мкм до 1 мм; – *метод химического травления без маски* локализует травление на определенных участках заготовки (анода). Электролит выходит через отверстия, перфорированные в маске, а затем выходит через тонкий зазор между рабочей деталью и текстурированной подложкой. Маскировка каждой заготовки не требуется, и процедура позволяет текстурировать большие области и создавать несколько видов МЭТ на одной поверхности одновременно; – *реактивное ионно-лучевое травление*. Методы, основанные на механическом удалении материала основаны на механическом воздействии, которое удаляет материал подложки из желаемых областей. Механические методы текстурирования часто предпочтительнее высокотемпературных методов из-за отсутствия термического влияния при обработке. Основными методами этой категории являются: – струйно-абразивная обработка (САО), например, для получения смазочных карманов; – *точение, фрезерование, шлифование и др.* – получение канавок, волнистого профиля и пр.; – *ультразвуковая обработка* на станках с ЧПУ (CNC-UM) основана на удалении материала при механическом соударении подложки с микроабразивными частицами с очень высокой скоростью, сообщаемой вертикальным вибрационным режущим инструментом; – *вибромеханический метод текстурирования (VMT)* микрорежущим инструментом с индуцированным колебательным движением. Размер МЭТ, созданных с помощью технологии VMT, ограничены глубиной 2–50 мкм, диаметром пор 100–500 мкм и диаметром окружности 50 мкм (также можно обрабатывать непрерывные канавки).

Технологии с перераспределением материала поверхностного слоя. *Механическое перемещение материала*: – *виброобкатывание и вибровыглаживание* – инструмент (шар или сферический наконечник) выдавливает смазочные канавки на цилиндрических и торцовых поверхностях; – *виброударный метод поверхностно-пластического деформирования* для создания дискретно-ориентированной топографии на рабочих поверхностях деталей в виде эллипсоидных лунок глубиной от 10 до 40 мкм и плотностью от 15 до 45%; – *техника тиснения* использует инденторы, узорча-

тые инструменты или валики. Механизм нанесения рисунка основан на переносе формы инструмента на поверхность заготовки посредством пластической деформации; – *полировка*; – лазерная ударная обработка (LSP). *Химически-активированное вытеснение материала* основано на химическом перемещении вещества, таком как молекулярная миграция и поверхностное сморщивание на полимерных пленках. Получают МЭТ с глубиной и шириной от десятков нанометров до почти 500 нм.

Технологии текстурирования в процессе формообразующих операций (прокатка, литье, штамповка и др.).

Самоорганизующиеся процессы текстурирования. Текстура формируется в результате протекания последовательных процессов взаимодействия и изменения поверхностей во фрикционном контакте. Например, выборочное изнашивание структурных составляющих гетерогенных сплавов, например, в баббитовых подшипниках; или при упрочнении основного материала детали.

При оценке геометрии текстурированных поверхностей, получаемой путем нанесения МЭТ в виде лунок или выступов с размерами, существенно превышающими высоту и шаг неровностей профиля исходной поверхности кроме обычно контролируемых параметров макрогеометрии, волнистости, шероховатости и субшероховатости следует учитывать геометрические параметры текстуры относительно средней поверхности профиля шероховатости: $\pm T_{\max}$ – наибольшая высота (глубина) МЭТ (расстояние от средней поверхности профиля шероховатости), «+» для МЭТ в виде выступов, «-» для МЭТ в виде ямок (лунок); $\pm T$ – средняя высота (глубина) МЭТ; S_{mt} – средний шаг МЭТ, при необходимости в продольном и поперечном направлениях; N – число МЭТ на базовой поверхности; $\pm V_{met}$ – объем единичного МЭТ; $V = \pm V_{met} \cdot N$ – общий объем МЭТ, расположенных на базовой поверхности; $\xi = h/d$ – соотношение основных размеров МЭТ, где h и d – наибольшие значения высоты и поперечного размера МЭТ; F_{met} – площадь в плане единичного МЭТ; $f = N F_{met} / F_b = N_x N_y F_{met} / F_b$ – относительная площадь, занимаемая МЭТ на базовой поверхности, где N_x – число МЭТ в ряду в направлении оси X , N_y – число МЭТ в ряду в направлении оси Y , $F_b = L_x L_y$ – площадь базовой поверхности; T_p – высота сглаживания профиля текстуры (для выступов МЭТ); T_v – глубина сглаживания профиля текстуры (для ямочных МЭТ); tp_t – относительная опорная площадь текстуры. Параметры шероховатости поверхности, расположенные между МЭТ'ами и на элементах МЭТ

целесообразно оценивать общепринятыми параметрами. Может также использоваться более подробное описание 3D модели МЭТ.

Требует уточнения методика оценки физико-химического состояния текстурированного поверхностного слоя. Особое значение приобретает оценка функциональных свойств: 1. Физические свойства - поверхностной энергии, определяющих такие поверхностные явления, как смачивание, адгезия, капиллярность; оптических; термических механизмы теплопередача (теплообмен) проводимостью или излучением 2. технических свойств – механических, гидродинамических, трибологических и др.

Харламов Ю.А. Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Северодонецк, Украина

УЧЕТ УСЛОВИЙ ИЗНАШИВАНИЯ СОПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИХ УПРОЧНЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ

Одним из направлений технологии ремонтного производства является разработка информационных моделей технологических ремонтных блоков для восстановления деталей машин в зависимости от условий эксплуатации контактирующих пар, характера отказов и закономерностей их износа. В известных работах не учитывается, что износ деталей сопряжений по поверхностям контакта часто бывает неравномерным по ряду причин – неравномерное распределение удельных давлений и скоростей относительного скольжения, различающиеся условия смазывания, поступление абразивов, удаление частиц изнашивания и пр. Именно износ сопряжения является геометрической характеристикой потери его начальных показателей и выходным параметром, влияющим на надежность машин и механизмов. Сопряжения поверхностно упрочняемых и восстанавливаемых деталей по условиям изнашивания их контактирующих поверхностей можно разделить на 11 групп (табл. 1), из которых первые пять групп соответствуют классификации подвижных сопряжений деталей машин, разработанной проф. Прониковым А.С. Последние по характеру взаимного сближения деталей сопряжения подразделяются на два типа: А – с постоянными условиями контакта; Б – с переменными условиями контакта. В сопряжениях типа Б

происходит самоустановка изношенных деталей и износ больше сказывается на функциональных свойствах сопряжения. Поэтому заслуживает внимания подход к проектированию поверхностных слоев и технологий восстановления деталей, учитывающих условия изнашивания сопряжений.

Для сопряжений 1-й группы интенсивность и продолжительность изнашивания на окружности определенного радиуса каждой из поверхностей будет одинаковой. Будет одинаковым износ по всей окружности и для анализа деталей достаточно рассмотреть осевое сечение. На этой основе могут быть спроектированы детали с поверхностными слоями с переменными толщиной и свойствами по радиусу поперечного сечения.

Таблица 1 – Классификация изнашиваемых сопряжений деталей машин

Группа	Условия изнашивания	Примеры сопряжений
1	2	3
1	Одинаковые условия изнашивания для точек обеих поверхностей, расположенных на одной траектории.	1А. Постоянные условия контакта – осевые подшипники скольжения; шестеренчатые насосы (торцовые поверхности шестерен и боковые стенки корпуса насоса); конические тормоза и фрикционные муфты; торцевые уплотнения и пр. 1Б. Переменные условия контакта – запорные прецизионные пояски деталей запорной РМатуры; шаровые краны; диски фрикционных муфт; торцевые уплотнения; конусные краны и др.
2	Постоянные условия изнашивания только для одной детали сопряжения	2А. Постоянные условия контакта – колодочные тормоза с жестким закреплением колодки; ходовой винт-гайка; шестеренчатые насосы (контакт головок зубьев и корпуса насоса) 2Б. Переменные условия контакта – вал-подшипник скольжения; осевые опоры скольжения с самоустанавливающимися несущими поверхностями (колодками); колодочные тормоза с самоустановкой колодок; круговые направляющие скольжения при эксцентричной нагрузке; центробежная колодочная муфта; тормозные диски; дисковый тормоз и др.

1	2	3
3	Переменные условия изнашивания для всех точек обеих деталей сопряжения с низшими кинематическими парами	3А. Постоянные условия контакта – золотниковые пары в гидрораспределителях; поршневые кольца-гильза цилиндра; линейные подшипники скольжения и др. 3Б. Переменные условия контакта - пластинчатый насос; поступательные направляющие скольжения; кулиса-камень; пластины-корпус и пластины-ротор в пластинчатых насосах и гидромоторах; пазы полумуфт и выступы промежуточного диска крестовых муфт; пружинно-кулачковая предохранительная муфта и др.
4	Переменные условия изнашивания для всех точек обеих деталей сопряжения с высшими кинематическими парами	4А. Постоянные условия контакта – зубчатое зацепление; кулачок-толкатель; шестеренчатые насосы (зубья шестерен) и др. 4Б. Переменные условия контакта - колесо-рельс; подшипники и направляющие качения; обгонная фрикционная роликовая муфта; фрикционные катки; шариковый винт и др.
5	Повреждаемость деталей, контактирующие с внешней средой – почвой, породой, обрабатываемой деталью или заготовкой, потоком жидкости или гидроабразивной	5А. Постоянные условия контакта – режущий инструмент с жесткой установкой; зуб ковша экскаватора; контакт заготовок с инструментом при волочении, экструзии, дорновании; лопасти мешалок и пр. 5Б. Переменные условия контакта - лемехи плугов; плавающий режущий инструмент; дробилки молотковые и роторные; струйно-абразивная обработка; загрузочные устройства доменных печей и др.
6	Сопрежения деталей с гарантированным натягом (повреждения вследствие фреттинг-коррозии)	Посадки подшипников на вал или в корпус; соединение бронзового венца червячного колеса со стальной ступицей; поршневые пальца; сопряжения поверхностей валов со ступицами лопаток турбин, компрессоров бандажей железнодорожных колес, импеллера с валом в химическом реакторе и т. д.; клиновые, заклепочные, штифтовые и др. соединения; шлицевые, шпоночные сопряжения и пр.

1	2	3
7	Подвижные сопряжения деталей, контактирующие через твердую среду	Взаимодействие инструментов с обрабатываемыми материалами при прокатке, штамповке, притирка (притир-абразивная среда-деталь); конусные дробилки; щековые дробилки; валковые дробилки и пр.
8	Подвижные и неподвижные сопряжения деталей, контактирующие через эластичную	Герметизирующие устройства, а также различные запорные устройства.
9	Запорные и регулирующие устройства, работающие в режиме замыкания и размыкания и предназначенные для перекрытия потоков среды	<i>Краны</i> (шаровые и конусные), у которых запирающий или регулирующий элемент, имеющий форму тела вращения или его части, поворачивается вокруг собственной оси, произвольно расположенной по отношению к направлению потока рабочей среды. <i>Клапаны</i> (вентили), у которых запирающие элементы (тарельчатые (золотниковые) или конические) перемещаются параллельно оси потока рабочей среды. <i>Задвижки</i> , у которых запирающий или регулирующий элемент перемещается перпендикулярно оси потока рабочей среды. Клиновые задвижки с двухдисковым или упругим клином. Дисковые затворы, у которых запирающий или регулирующий элемент имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной или расположенной под углом к направлению потока рабочей среды.
10	Электрические контакты (разрывные, скользящие и неподвижные)	Одновременное действие механических, тепловых и электрических факторов приводит к существенному изменению свойств контактирующих материалов и их фрикционно-износостойких характеристик.
11	Специальные сопряжения	Работа в условиях трения в вакууме, низких или высоких температурах, радиационной среде и пр.

У сопряжений 2-й группы условия изнашивания сохраняются только для одной детали. Равномерный износ проявляется у одной из сопрягаемых деталей, а для другой неравномерный или даже имеет локальный характер. Для сопряжений 3-й и 4-й групп характерно отсутствие постоянных условий изнашивания для всех точек обоих тел, что приводит их к неравномерному износу. К 5-й группе Проников А.С. относит поверхности деталей, контактирующие с внешней средой – почвой, породой, обрабатываемой деталью или заготовкой, потоком жидкости или гидроабразивной среды и пр. Характер взаимодействия с этой средой и будет определять форму изношенной поверхности.

По условиям изнашивания и функциональному назначению в табл. 1 приведено еще 6 групп сопряжений, отличающиеся наличием в контакте натяга, промежуточных несмазочных средств, режимом и характером прерывающегося контактирования, влиянием протекающей рабочей среды и других дополнительных эффектов. Предлагаемая классификация может использоваться для создания типовых и модульных технологических процессов упрочнения и восстановления сопряжений деталей машин.

Неравномерность изнашивания в пределах поверхностей контакта приводит к необоснованному увеличению толщины упрочняемых и восстановительных поверхностных слоев. Перспективным является развитие методов упрочнения и восстановления деталей с переменными значениями параметров упрочненного слоя или покрытия поверхности: толщины, состава, интенсивности изнашивания и пр. На отдельных участках поверхностей можно использовать сменные вставки из более стойкого материала или со специальным поверхностным упрочнением, способствующими выравниванию интенсивности изнашивания по поверхности. Неравномерность изнашивания можно определять по данным анализа технического состояния деталей при ремонте машин, а в случае проектирования новых изделий по данным расчетов на износ сопряжений и механизмов.

Харламов Ю.А. Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Северодонецк,
Клименко С.А. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Современная инженерия поверхности становится все более наукоемкой и одним из важнейших направлений научно-технического прогресса. Формирование ее как научно-технического направления является результатом развития комплекса фундаментальных и прикладных наук. Изучением физических и химических явлений на границе раздела фаз занимаются фундаментальные науки о поверхности (физика поверхности, химия поверхности, физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов, трибология, коррозиология и др.). Непосредственно с поведением поверхностей твердых тел занимаются такие прикладные дисциплины, как триботехника, защита от коррозии, обеспечение качества поверхностного слоя, теория контакта твердых тел и пр. Инженерия поверхности аккумулирует достижения этих наук в технике и технологии и постоянно интегрирует в себя результаты различных научных направлений, связанных с получением и использованием поверхностных слоев изделий. В научно-технической и учебной литературе понятием «инженерия поверхности» охватывается главным образом совокупность способов и технологических приемов получения поверхностных слоев и покрытий с требуемыми функциональными свойствами [1]. При этом в процессе обучения и повышения квалификации сужается кругозор специалистов по инженерии поверхности (ИП), требующего комплексного подхода к вопросам ИП [2]. В настоящее время специалисты инженерии поверхности (ИП), продолжают развиваться, расширяется сфера ее применения, тем не менее ИП можно рассматривать как комплексное научно-техническое направление, включающее в себя такие составные части: 1. Материаловедение поверхностных слоев и покрытий; 2. Проектирование поверхностных слоев и покрытий; 3. Технология поверхностных слоев и покрытий. 4. Оценка и контроль качества поверхностных слоев и покрытий. Каждая из этих частей

Материаловедение поверхностных слоев и покрытий является частью общего материаловедения, изучающим структуру и свойства

поверхностных слоев и покрытий и их изменения в зависимости от технологических и эксплуатационных воздействий. Выходом этих исследований является оценка физико-химического состояния системы: основной материал детали – поверхностный слой (или покрытие с приповерхностным слоем). Она включает параметры и распределения по глубине наклепа, остаточных напряжений, структурно-фазового состояния, химического состава и пр. Эти данные являются основой для выбора способов поверхностного упрочнения деталей, операционных режимов поверхностной обработки, маршрутных процессов обработки поверхностей деталей, выбора материалов покрытий и др. Здесь весьма важной является природа границы раздела основного материала с упрочненным поверхностным слоем (покрытием). В случае использования покрытий используются оценки и измерения адгезионной прочности (прочности сцепления). Задачей материаловедения является оценка роли структуры поверхностных слоев и покрытий и ее стабильности в обеспечении требуемых функциональных свойств поверхности. Понимание роли структуры и физико-химического состояния поверхности стимулирует также разработку новых методов поверхностного упрочнения и нанесения покрытий, а также расширение функциональных свойств и применений поверхностей конструктивных элементов. Весьма важным также является разработка новых материалов для покрытий и технологий их производства.

При проектировании поверхностных слоев и покрытий на основе выполненных НИР выполняют выбор и назначение параметров качества поверхностного слоя деталей: макроотклонения H_{\max} , H_p ; волнистости Wz , Wp , Sm_w ; шероховатости Ra , Rz , R_{\max} , Rp , Sm , S , tp ; субшероховатости R_{\max}' , Sm' ; физико-химических свойств $\sigma_{\text{ост}}$, $H_{\text{с0}}$, $H_{\mu 0}$ (U_H), h_{μ} , ε , l_3 , ρ_D [2]. Однако появляется достаточно много новых исследований влияния микрогеометрии поверхностей на их поведение при контактном нагружении, трении и износе, адгезионном взаимодействии и других воздействиях. Показан преобладающий эффект 3D параметров микро топографии поверхности и невозможность полной оценки функциональных характеристик поверхностей и деталей с помощью стандартных 2D-параметров шероховатости. Наглядно потребность в 3D-параметрах характеризует контактирование твердых тел. Фактическая и контурная площади контакта определяются деформированием вершин микровыступов шероховатости и макровыступов волн соответственно. Для более точного определения фактической и контурной площадей контакта необходимо

знать не только высотные, но и поверхностные параметры (топографию) микрогеометрии контактирующих поверхностей. Основные 3D-параметры микро-топографии поверхности в соответствии со стандартом ISO 25178 [3] представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные 3D-параметры микро-топографии поверхности

Группа параметров микро-топографии поверхности	3-D параметры микро-топографии поверхности
Высотные (В)	Sa, Sq, Sz
Амплитудные (Ам)	Ssk, Sku
Пространственные (П)	Sds, Str, Sal, Std
Гибридные (Г)	Sdq, Ssc, Sdr
Функциональные (Ф)	Sbi, Sci, Svi

Возможные корреляции между шероховатостью поверхности (текстурой) и основными функциональными свойствами – усталостью, герметизирующей способностью, адгезией, трением, износом и коррозионной стойкостью приведены в табл. 2. Двенадцать параметров шероховатости и три функциональных индекса играют особо важную роль в проектировании и получении функциональных поверхностей. В частности, подход, основанный только на использовании одной или группы параметров шероховатости высоты – Ra или Ra, Rq, Rz, Rt , крайне недостаточен. Например, для прогнозирования усталости необходимы измерения как амплитудных, так и гибридных параметров (Ssk, Sku, Sdq). Интенсивность трения и абразивная износостойкость зависят от всех пяти групп параметров S-шероховатости и, как результат, их предсказание очень сложно. Три функциональных индекса (Sbi, Sci, Svi) влияют, как и высотные параметры, на все выбранные функциональные свойства поверхности. Использование микро-топографического описания поверхности уже оказалось весьма эффективным для исследований и разработки технологий производства продукции с регламентированной микро-топографией поверхности: производство тонкого листа для штамповки, глубокой вытяжки, нанесения покрытий, выпуска автолиста с регламентированной микро-топографией поверхности для штамповки кузовов и других деталей автомобиля; производство проволоки для электронной промышленности; производство деталей для узлов трения; подготовка поверхностей под покрытия для обеспечения высокой адгезионной прочности и др.

Таблица 2 – Влияние 3D-параметров микротопографии поверхности на функциональные свойства деталей

Функциональные свойства поверхности	Параметры микротопографии поверхности				
	В	Ам	П	Г	Ф
Контактная жесткость	⊕	⊕	⊗	⊗	⊕
Коэффициент трения	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Износостойкость	⊕	⊕	⊗	⊕	⊕
Несущая способность	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Герметичность соединен.	⊕	⊕	⊗	⊕	⊕
Предел выносливости	⊕	⊗	0	∅	⊕
Адгезионные свойства	⊕	⊕	∅	⊗	⊕
Коррозионная стойкость	⊕	∅	0	⊕	⊕

Обозначения: ⊕ – существенное влияние; ⊗ – некоторое влияние; ∅ – незначительное влияние, зависящее от обстоятельств; 0 – не влияет

На стадии проектирования выбираются конструктивные особенности поверхностного слоя – толщина (равномерная или переменная); однослойное или многослойное покрытие; сплошной или дискретный поверхностный слой (покрытие); градиентный или однородный слой и пр. При этом должны учитываться механические и иные свойства не только поверхностного слоя, но и основного материала детали, совместимость с материалом или поверхностным слоем контртела. В этой части ИП самостоятельными являются разделы, охватывающие проектирование функциональных поверхностей: антифрикционных, износостойких, фрикционных, теплостойких и пр. *Технология поверхностных слоев и покрытий* охватывает все технологические методы модифицирования поверхностных слоев и нанесения функциональных покрытий и пленок, которые подразделяются на механические, термические, термомеханические, химико-термические, электрохимические и химические, физические и комбинированные. Описанию этих технологий и соответствующего оборудования, разработке операционных технологических процессов посвящено достаточно много работ и учебных курсов как по отдельным методам, так и в целом технологическим методам ИП. Многие из этих технологий являются многооперационными и требуют разработки маршрутных технологических процессов. Поэтому здесь рассматриваются также технологии подготовки поверхностей под покрытия и последующая их обработка механическими, термическими, химическими и другими методами, а также высококонцентрированными ис-

точниками энергии. Анализ должен подвергаться весь процесс изготовления и эксплуатации поверхностно упрочняемых деталей с учетом явления технологической наследственности [4].

Оценка и контроль качества поверхностных слоев и покрытий играет важную роль на всех этапах жизненного цикла деталей. Общепринятым является использование средств контроля параметров шероховатости, волнистости, поверхностных остаточных напряжений, микротвердости, а также комплексных параметров, характеризующих несущую способность поверхности в целом. Важными и необходимыми являются параметры, характеризующие микроструктуру поверхностного слоя (покрытия) по толщине. Они включают в себя: химический состав на макро- и микроуровнях; морфология и ориентация зерен; дефекты, такие как поры, нерасплавленные частицы, микро- и макротрещины и дислокации, их количество и распределение. Особую трудность представляет во многих случаях металлографическая подготовка образцов. Применяют неразрушающие методы контроля, оптическую и электронную микроскопию, различные методы спектроскопии, многочисленные методы измерения пористости и газопроницаемости, механических и физических свойств и пр. В производстве основной интерес представляют измерения геометрии детали после нанесения покрытий и их механической обработки, толщины покрытия, адгезии, твердости, прочности, модуля Юнга, теплопроводности и пр. Для лабораторных исследований применяемый круг экспериментальных методов исследований значительно шире.

Литература

1. Ющенко, К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисово – К. : Наук. думка, 2007. – 559 с.
2. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. – М. : Машиностроение. 2008. – 320 с.
3. ISO 25178-2. Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
4. Клименко, С.А. Наследование и технологическое обеспечение эксплуатационных свойств изделий с покрытиями / С.А. Клименко, А.Г. Колмаков, В.Я. Лебедев, В.И. Бородавко // Вести Нац. Акад. наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2015. – № 3. – С. 31–40.

Хейфец М.Л. Институт прикладной
физики НАН Беларуси,
Баранов Ф.Л., Гутковский А.И.
ООО «БСВТ-новые технологии»
Бородавко В.И., Грецкий Н.Л.
ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси,
Хилько Д.Н. ООО «ШТРАБАГ Инжиниринг
Центр», Минск, Беларусь

КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ ФЕРРОПОРОШКОВ В СОЧЕТАНИИ С ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Надежности и долговечности деталей машин, во многом определяется состоянием их поверхностного слоя. Основными причинами потери работоспособности узлов и механизмов являются изнашивание и усталостные поломки деталей, их разрушение вследствие ползучести, коррозия, эрозия в различных средах, кавитационное разрушение и всевозможные сочетания этих причин. Свыше 80% отказов изделий обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, в которых изнашивание играет доминирующую роль. При упрочнении поверхностей деталей машин используют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Среди наиболее перспективных и ресурсосберегающих способов упрочнения являются электрофизические, использующие энергию электромагнитного поля и деформирующего инструмента.

Обеспечить высокое качество изготовленных изделий в процессе разработки и постановки их на производство можно за счет внедрения новых методов обработки и упрочнения деталей, отвечающих за ресурс машин. Так в ООО «БСВТ-новые технологии» при разработке и постановке на производство роботизированного огневого комплекс «Берсерк» (необитаемая наземная боевая машина) (рис. 1) с целью улучшения физико-механических характеристик упрочненных поверхностей деталей с минимальными затратами применяется технология комплексного упрочнения электромагнит-

ной наплавкой (ЭМН) ферропорошков в сочетании с поверхностно-пластическим деформированием.



Рис. 1 – Роботизированный огневой комплекс «Берсерк»

а – испытание опытного образца; *б* – разведывательно-огневая поворотная платформа; *в* – подвижная платформа

Роботизированный огневой комплекс «Берсерк» предназначен для ведения оптической разведки, огневого прикрытия штурмовых подразделений и обороны важных стационарных объектов, позиций ПВО. В нем наиболее важным является сборочный узел, обеспечивающий угломестное позиционирование при наведении огня. Данное изделие является несущей частью автоматической системы управления (АСУ) наведения огня, для точного определения позиции орудия в режиме реального времени. В данном узле высокие требования к качеству изготовления предъявляются к детали «Полуось» (рис. 2, *а*), обеспечивающей беспрепятственное вращение корпуса орудий относительно разведывательно-огневой поворотной платформы. Для улучшения механических характеристик рабочей поверхности детали «Полуось» и повышения срока службы предложено вместо поверхностной закалки производить упрочнение путем ЭМН порошка ферро-титана (Fe-Ti) в сочетании с поверхностно-пластическим деформированием.

В процессе упрочнения происходит следующим образом: в зазор между вращающейся деталью и полюсным наконечником электромагнита из дозирующего устройства непрерывно подается порошок

ферро-титана. Ориентируясь в зазоре вдоль силовых линий магнитного поля, частицы ферропорошка образуют множество токопроводящих цепочек, замыкающих электрическую цепь между полюсным наконечником и деталью. Частицы у поверхности детали, в зоне максимального электросопротивления под воздействием электрического тока расплавляются. Капли расплава распределяются по поверхности детали и подвергаются пластическому деформированию шариковым накатником. Для стабилизации процесса электромагнитную наплавку ведут в пульсирующем магнитном поле. В такой установке в качестве источника технологического тока используют специально разработанный тиристорный генератор импульсов. Благодаря наличию вибрации сердечника процесс стабилизируется в широком диапазоне варьирования технологических факторов.

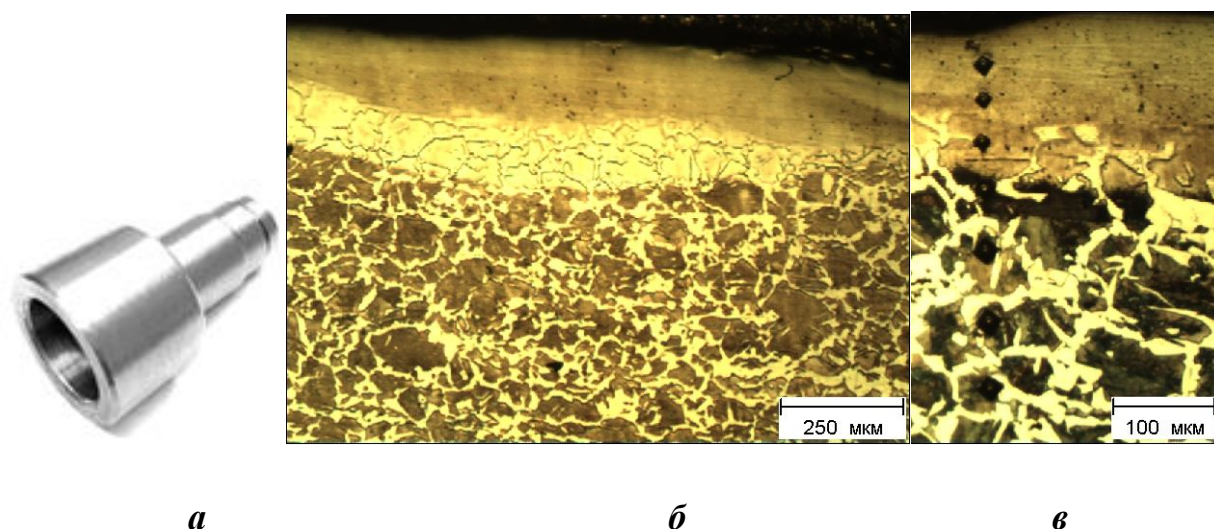


Рис. 2 – Упрочнение ЭМН с поверхностно пластическим деформированием:
а – упрочняемая деталь; *б* – наплавленный слой и зона термического воздействия в системе Fe-Ti; *в* – результат измерения микротвердости упрочненной зоны

Изучение полученного покрытия показало, что толщина и структура наплаваемого слоя являются стабильными. Толщина зоны оплавления составляет 154–198 мкм, а зона термического влияния 146–202 мкм (рис. 2, б). Измерение микротвердости от поверхности покрытия в глубь образцов проводили при нагрузке на индентор 50г (рис. 2, в). По данным измерения, максимальная микротвердость упрочненной поверхности достигает 6–7 Гпа, а величина упрочненной зоны составляет порядка 300–400 мкм. Испытания опытного образца «Берсерк» показали, что эксплуатационный ресурс упрочненной детали предложенным способом увеличился в

2,0–2,5 раза по сравнению с упрочнением поверхностной закалкой. Высокие физико-механические свойства полученного покрытия и малое термическое воздействие на основу позволяют рекомендовать предложенный способ упрочнения для восстановления высокоточных деталей работающих при высокой нагрузке в условиях повышенного износа.

Таким образом, технология комплексного упрочнения с применением электрофизических источников энергии в сочетании с поверхностно-пластическим деформированием обеспечивает заданные геометрические характеристики детали и повышает физико-механические свойства упрочняемой поверхности.

Хилько Д.Н. ООО «ШТРАБАГ Инжиниринг Центр»,
Минск, Беларусь

ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА ФЕРРОПОРОШКОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ НА ПЛОСКИЕ РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Технологические процессы изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин (ножи, лемеха) и молотков зернодробилок, имеющих плоскую конструкцию, предусматривают использование дорогостоящих легированных сталей. Для повышения износостойкости таких изделий зачастую используются различные термические методы обработки, которые значительно увеличивают стоимость конечного продукта. При этом актуальной является проблема повышения их ресурса работы.

Для повышения срока службы быстроизнашиваемых плоских изделий в условиях интенсивного абразивного износа используются различные методы наплавки: индукционная, плазменная, электродуговая. Наиболее доступным способом наплавки является автоматическая электродуговая наплавка проволокой и ручная электродуговая наплавка электродами, однако, им присущи некоторые недостатки при нанесении защитных слоев – относительно низкая производительность, высокое удельное температурное воздействие на основу и невозможность нанесения тонких слоев покрытий.

Одним из новых методов упрочнения рабочих поверхностей изделий является электродуговая наплавка ферропорошков в составе наплавочных паст в комбинированных электрофизических полях. При данном способе наплавки основную роль – нагрев и плавление присадочного материала – выполняет энергия электрического поля, вспомогательную – удержание порошка в рабочей зоне и формирование цепочек-микроэлектродов – энергия ультразвукового поля. Для реализации способа наплавки плоских поверхностей изделий изготовлена экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. При сближении волновода с пастой в межэлектродном промежутке под воздействием мощного ультразвукового поля из частиц ферропорошка формируются токопроводящие цепочки-микроэлектроды. Наложение на межэлектродный промежуток электрического поля способствует возникновению импульсных разрядов, в результате чего происходит нагрев и плавление частиц порошка.

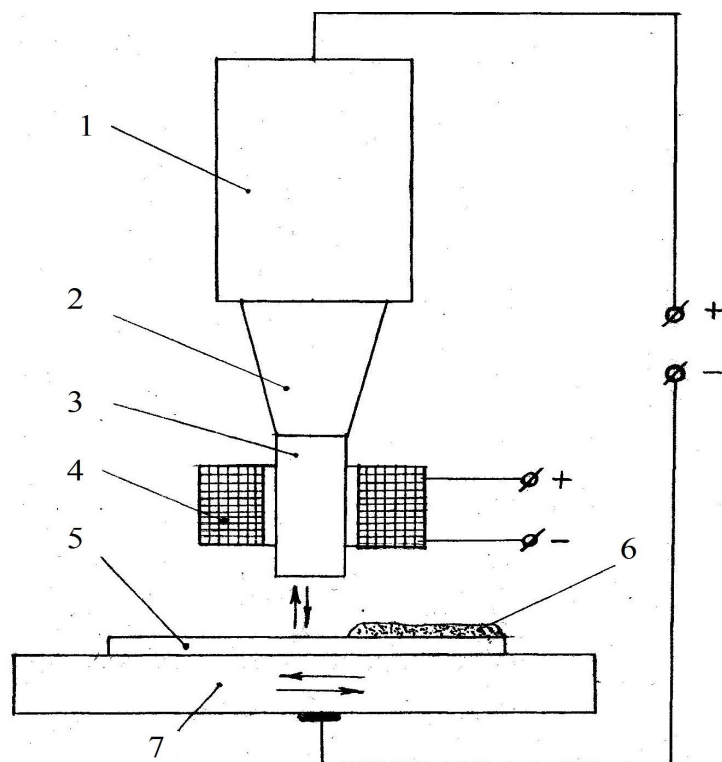


Рис.1 – Схема наплавки ферропорошковых материалов в составе паст на плоские поверхности изделий: 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – волновод; 3 – концентратор (полюсный наконечник); 4 – катушка электромагнита; 5 – обрабатываемая поверхность; 6 – токопроводящая паста; 7 – стол поперечно-строгального станка

Импульсный разряд имеет характер искрового и процесс заключается в образовании мельчайших жидких капель, взвешенных в низкотемпературной плазме, с возникновением сверхзвуковых ударных волн. Движение капель расплава к основному металлу происходит за счет резкого расширения газа при взрыве и вытеснения воздуха и паров жидкости из зоны взрыва, что полностью исключает их окисление, а, следовательно, обеспечивает получение покрытия с высокой прочностью сцепления с основным металлом. Токопроводящей пасты толщиной 1,5–2,0 мм, содержащий ферропорошок Fe-2% V (мас. доля 50%) гранулометрическим составом 200–400 мкм, эпоксидную смолу (мас. доля 35%), жидкое стекло (мас. доля 15%), предварительно наносится на обрабатываемую поверхность изделия. Волновод и изделие подключают к источнику сварочного тока при одновременном наложении на рабочую зону электромагнитного и ультразвукового полей. Наплавка ферропорошка Fe-2%V в составе пасты производилась на плоские заготовки из низкоуглеродистой стали при: силе сварочного тока 85–90 А, магнитной индукции 0,9–1,0 Тл, частоте ультразвуковых колебаний 21–23 кГц, амплитуде колебаний 8–10 мм. Результаты проведенных исследований показали, что данная схема процесса позволяет значительно увеличить коэффициент использования порошка. Использование пасты дает возможность получать многослойные покрытия с различными физико-механическими свойствами по толщине, а также позволяет вводить легирующие и другие компоненты в наплавочную ванну. Кроме того, цепочки-микроэлектроды из частиц ферропорошка служат волноводами, обеспечивающих передачу концентрированных механических колебаний ультразвуковой частоты в ванну расплава металла основы и порошка, оказывая положительное влияние на формирование физико-механических и эксплуатационных свойств.

По результатам сравнительных испытаний установлено, что электродуговая наплавка ферропорошка в составе пасты сохраняет геометрию режущей кромки лемехов картофелеуборочных машин, способствует их самозатачиванию в процессе работы и обеспечивает увеличение срока службы изделий в 1,5 раза.

КОНТРОЛЬ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗАСОБАМИ

Безпечна експлуатація об'єктів газотранспортних систем неможлива без систематичного проведення діагностичного контролю, в тому числі дослідження напружено-деформованого стану трубопроводів. Підприємства нафтогазової галузі потребують простих і в той же час ефективних рішень на основі аналізу інформації про стан системи, що отримується з датчиків.

Контроль напружено-деформованого стану металу в промислових умовах проводиться технічними засобами, які засновані на різних фізичних методах (акустичні, електромагнітні, магнітні і т.д.) Переваги електромагнітних засобів вимірювання на основі магнітопружних датчиків проявляються в найбільшій мірі при вимірюванні параметрів об'єктів, що працюють у важких умовах експлуатації (прокатні стани, шахтні підйоми, бурові установки, сталеві канати підвісних мостів і т.п.). В роботі [2] представлено обладнання сталевих кабельних мостів, що знаходяться в експлуатації. Електромагнітні датчики встановлюються на мостові кабелі на етапі будівництва об'єкта, знаючи взаємозв'язок між магнітною проникністю і напруженням. Магнітні властивості феромагнітного матеріалу змінюються під впливом напружень і під впливом температури. За допомогою мережі еластомагнітних датчиків безперервно контролюється фактичне напруження сталевих тросів і гарантується надійність конструкції.

Ефективний метод для ранньої діагностики концентрації напружень в нафтогазопроводах пропонується в публікації [3]. Розроблена система ефективно використовується для виявлення залишкового напруження, напруги деформації та напруги при зварюванні у феромагнітних матеріалах та експериментах для підтвердження доцільності вибору електромагнітного неруйнівного методу на основі магнітопружних датчиків.

Удосконаленню магнітоанізотропного методу визначення механічних напружень присвячена робота [4]. Розроблена система моніторингу, направлена на запобігання аварій на магістральних газоп-

рородах, нафтопроводах, аміакопроводах та запобігання забруднення навколишнього середовища.

В Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу проводяться дослідження та розробка системи безперервного контролю режимів роботи магістрального трубопроводу для контролю НДС магнітоанізотропним методом. Аналіз основ магнітопружного методу визначення механічних напружень показав кореляційний зв'язок між зміною магнітної проникності і механічним напруженням [5].

На основі проведеного аналізу виділено найбільш перспективні методи контролю та вказано на один із їх основних недоліків: оцінка здійснюється по діаграмі залежності інтенсивності магнітних властивостей від механічної напруги металу. Враховуючи це, запропоновано вдосконалений електромагнітний вимірювач напружень ИНИ-1Ц з чотиріполюсним магнітоанізотропним перетворювачем, як найбільш доцільним для практичного застосування. Основою конструкції лежить модернізований вузол обробки інформативного сигналу на платформі Arduino [6]. Авторами розроблений аналоговий модуль для перетворення двополярного сигналу базового блоку вимірювача механічних напружень в однополярний, цифровий модуль на платформі Ардуіно, модуль дистанційної передачі інформації та програмне забезпечення, яке обчислює залежність зміни сигналу від механічного зусилля, використовуючи вибірку кількох точок з статистики вимірювань.

Суть нововведення полягає у використанні аналого-цифрового перетворення сигналу з подальшою обробкою програмним пакетом. Це, в свою чергу, забезпечує обчислення залежність зміни сигналу від механічного зусилля. Відтак вдалося досягнути зручного візуального контролю на електронному табло монітора чи смартфоні. Впровадження системи дистанційного контролю дасть можливість контролювати стан трубопроводу в режимі реального часу. При цьому моніторинг здійснюється без порушення його цілісності і зупинки роботи.

Література

1. Неразрушающий контроль: Справ. В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля / В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Кн. 2: Оптический контроль / В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Фили-

нов. Кн. 3: Радиоволновой контроль / В.И. Матвеев. – М. : Машиностроение, 2004. – 832 с.

2. Cappello, Carlo. Calibration of Elasto-Magnetic Sensors on In-Service Cable-Stayed Bridges for Stress Monitoring / Carlo Cappello, Daniele Zonta // *Sensors*. – 2018. – 18. – P. 466.

3. Liu, B. The Study of Electromagnetic Stress Testing Method on Oil-Gas Pipelines Based on WT / B. Liu, W.R. Sun, Y.R. Lin // *Geomaterials*. – 2014. – 4. – P. 55–63.

4. Визначення напруженого стану зварних магістральних трубопроводів магнітоанізотропним методом: дис. канд. техн. наук/ Мінаков С.М. – К. : Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т», 2012. – 257 с.

5. Циганчук, В.В. Дослідження взаємозв'язку фізико-механічних характеристик феромагнетиків на основі магнітопружних датчиків механічних напружень / В.В. Циганчук, Л.С. Шлапак // *Нафтогазова енергетика*. – 2018. – № 2. – С. 32–39.

6. Петин, В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino / В.А. Петин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2015. – 464 с.

Черновол М.И. Центральноукраинский национальный
технический университет, Кропивницкий
Лопата Л.А., Кобзарь В.Л. Институт проблем прочности
им. Г.С. Писаренко НАН Украины
Лопата А.В., Смирнов И.В. Киевский политехнический
институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина
Дудан А.В. Полоцкий государственный университет,
Новополоцк, Беларусь

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЙ

Независимо от области применения покрытий прочность сцепления является основным фактором, определяющим его пригодность. Рост адгезионной прочности повышает защитные способности и надежность покрытия. Вопросы адгезионной прочности затрагивают покрытия, клеевые и паяные соединения, биметаллы, композитные материалы с металлической, полимерной и кристаллической матрицей [1].

В технической литературе адгезия трактуется как возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведенных в соприкосновение. Такие тела принято называть адгезив (покрытие) и субстрат (основа). В случае однородных тел, адгезия тождественна когезии. Взаимодействие между адгезивом и субстратом, ведущее к прочной связи, характеризуется явлением, которое находит свое отражение в ряде гипотез и теорий, относящихся к областям механики и физической химии [2].

Одной из первых, предложенных для объяснения процессов сцепления, как результат заклинивания материала покрытия в микродефектах поверхности основы, была гипотеза «механической» адгезии. Согласно этой гипотезе впоследствии была разработана микрореологическая теория, в которой адгезионная прочность рассматривалась как понятие, связанное с увеличением фактической площади контакта. Для понимания данной теории использовалась теория упругости. Необходимо заметить, что современная трактовка «механической» теории адгезии не полностью исключает возможность взаимодействия компонентов за счет физических и химических процессов. Однако их долю считают несущественной и не учитывают [2, 3].

Ограниченность представлений об адгезионном взаимодействии только с позиции «механических» связей очевидна. Механическая связь – это сопутствующая, но не основная причина образования прочного соединения разнородных материалов.

Многочисленными экспериментальными данными доказано, что наибольшее практическое значение на образование прочных адгезионных связей оказывают физико-химические процессы. При этом характер связей может определяться количественным термодинамическим анализом. Последний необходим для обоснования выбора состава покрытия и основы с максимальным согласованием их свойств [2, 3].

Следует отметить, что при выборе рациональной технологии и режимов формирования покрытий особую важность приобретает кинетические оценки указанных свойств.

Адгезионное взаимодействие с образованием прочного соединения происходит в результате контакта и слияния очагов по всей поверхности. Такой процесс образования связей имеет термофлуктуационную природу и может рассматриваться, как указывает автор работы [2] с позиции активированного комплекса. Его суть заклю-

чается в следующем: в окрестностях деформационных выступов, в местах выхода в зону дислокаций и их скопления возникают поля упругих искажений, которые являются активными центрами взаимодействия. В пределах таких центров происходит разрыв или трансляция валентных связей с образованием между атомами соединяемых поверхностей новых. Многообразия явлений, происходящих на границе раздела фаз и описываемых теорией активированного комплекса, нашло отражение в ряде теорий взглядов, порою противоречиво трактующих адгезионную связь. К ним в свою очередь следует отнести: адсорбционную, электрическую, электромагнитную, химическую, диффузионную, электрорелаксационную, микрореологическую и др. [2, 3].

В частности, согласно адсорбционной теории связь между адгезивом и субстратом определяется адсорбцией адгезива на поверхности субстрата. Электрическая теория связывает образование соединения с представлениями донорно-акцепторного механизма и учитывает наличие двойного электрического слоя. Теории, которые определяют величину адгезии в зависимости от природы и числа связей, приходящихся на единицу площади, находят отражение в диффузионных теориях. К теориям, объясняющим причину адгезионной прочности, относится релаксационная, которая рассматривает процессы деформации, возникновения внутренних напряжений и релаксацию при отрыве покрытия. Существующие теории отражают какую-то одну сторону процесса адгезии. Вместе с тем, целесообразно было бы иметь единый подход к выяснению причин адгезии, а существующие теории представлять, как частные выражения этого единого подхода. Основопологающим в этом смысле, вероятно, может быть уравнение, приведенное А.Д. Зимоном [2, 3].

$$W = \bar{W} \cdot N$$

где \bar{W} – средняя энергия связи; N – число таких связей на единицу площади.

Решать частные задачи увеличения адгезионной прочности возможно, используя термодинамический анализ. В настоящее время он развивается в трех направлениях. Первое базируется на подходах классической термодинамики Гиббса и связано с расчетами конечных равновесных продуктов реакции между компонентами. Развитие данных работ дало возможность выполнять их для более сложных систем, например, «химическое соединение – многоком-

понентный твердый раствор». Второе направление основано на подходах термодинамики малых дисперсных систем Хилла и связано с расчетами метастабильных состояний. В этих расчетах учитывается существенный вклад поверхностной энергии фаз с дисперсным строением. Третье направление, развиваемое В.В. Федоровым и М.Х. Шоршоровым, связано с анализом термодинамических условий диспергирования веществ, при агрегатных фазовых превращениях и химического разложения.

Возникновение прочных адгезионных связей между компонентами обусловлено оптимальной длительностью контактирования фаз [2, 3].

При этом следует рассматривать два случая контактирования: 1) в контакте находятся твердая и жидкая фаза; 2) в контакте находятся две твердые фазы.

В первом случае, оптимальное время контактирования (t_k) должно быть

$$t_{ад} < t_k \leq t_p + t_{\delta} + t_3,$$

где $t_{ад3}$ – длительность, необходимая для возникновения прочных адгезионных связей по всей поверхности контакта; t_p – длительность реттордации (инкубационный период гетеродиффузии); t_{δ} – длительность диффузии на глубину; t_3 – длительность образования промежуточной зародышевой фазы.

Для определения времени запаздывания диффузии используется формула [3]:

$$t_p = t_0 \exp \left[\frac{e \cdot (E_T - E_{ж})}{\lambda \cdot k \cdot T} \right],$$

где t_0 – постоянная времени, обратно пропорциональная частоте собственных колебаний атомов; E_T , $E_{ж}$ – энергия активации диффузии соответственно твердой и жидкой фазы.

Во втором случае, когда в контакте находятся два твердых тела, определение t_k сводится к анализу длительности процесса образования прочного соединения по всей поверхности контакта

$$t_{ад} \leq t_k \leq t_p + t_{\delta} + t_3.$$

Образование прочных адгезионных связей – трехстадийный процесс [2,3]:

$$t_{ад} = t_{\phi} + t_a + t_{OB},$$

где t_{ϕ} – сближение атомов за счет пластической деформации и образование физического контакта (силы Ван Дер Ваальса) происходит

по мере деформации микровыступов на поверхности основы; t_{OB} – длительность объемного взаимодействия, при которой происходит гетеродиффузия, рекристаллизация и т.д.; t_a – длительность активации контактных поверхностей, на которых происходит образование химических связей (оценивается на основе соотношений абсолютных скоростей химических реакций первого порядка).

$$\frac{dN(f)}{dt} = [N_{\phi}(t) - N(t)] \exp - \frac{E_a}{kT} \exp \frac{S}{k},$$

где N – число атомов контактных поверхностей, вступающих в химическую связь; N_{ϕ} – число атомов, вступающих в физический контакт; E_a – энергия активации процесса; S – энтропия активации.

Общее уравнение для анализа роста прочности $\varepsilon(t)$, частный случай которого для фиксированного числа зародышей z_0 имеет вид:

$$\frac{G(f)}{G_m} = \frac{N(f)}{N_0} = 1 - \exp(K \cdot t^n),$$

где K – константа скорости реакций; $K = z_0 \cdot K_{\phi} \cdot K_3 \cdot K_p$ (K_{ϕ} , K_3 , K_p – соответственно константы скорости образования физического контакта, зарождения центров с прочной связью и их роста); t – время процесса; n – показатель степени, характеризующий порядок химической реакции; G_m – максимально возможная скорость реакции. Анализ адгезионных связей с позиции термодинамики показывает, что адгезию нельзя отождествлять с адгезионной прочностью. Для нарушения адгезии необходимо приложить внешнюю силу $F_{отр}$ определенной величины. Под действием силы граница раздела фаз переместится на некоторое расстояние « ℓ ». Произведение силы отрыва на расстояние « ℓ » составляет работу отрыва. При этом работа и сила отрыва не будут равны работе и силе адгезии. Указанное несоответствие обусловлено спецификой контактных явлений на границе «адгезия-субстрат», а также их собственными физико-механическими свойствами.

Обозначив, соответственно, $W_{ад}$ и $F_{ад}$ – работа и сила адгезии, можно записать условие

$$W_{отр} = W_{ад} + W_{\delta} + W_{\varepsilon} + W_n - W_{ВН},$$

где $W_{ад}$ – работа на преодоление сил адгезии; W_{δ} – работа, идущая на деформацию (изгиб) покрытия; W_{ε} – работа на преодоление электрического взаимодействия; W_n – работа на деформацию микронеровностей и др. потери; $W_{ВН}$ – работа, облегчающая отрыв покрытия за счет внутренних напряжений; и по аналогии

$$F_{omp} = F_{ад} + F_{\partial} + F_{э} + F_n - F_{вн},$$

где $F_{ад}$ – сила, необходимая для определения адгезии; F_{∂} – сила, требуемая для изгиба покрытия; $F_{э}$ – сила на преодоление электрического взаимодействия; F_n – сила на деформацию микронеровностей; $F_{вн}$ – сила, уменьшенная на величину внутренних напряжений покрытия.

Из приведенных соотношений видно, что работа и сила отрыва, как правило, больше работы и силы адгезии и используется для оценки работоспособности материалов с покрытиями.

В большинстве случаев, разработка и применение как теоретических, так и экспериментальных методов оценки указанных параметров вызывает определенные трудности. Для получения точных результатов испытаний и сопоставимых характеристик прочности необходимо учитывать специфику каждого из конкретных методов испытания. В частности, должны быть идентичны скорость отрыва, направление отрыва, время приложения усилия и его цикличность и т.д. Кроме того, требуется выдерживать заданную геометрию и масштаб образцов.

Приведенный в последующем разделе теоретический анализ кинетики формирования контакта между покрытием и основой позволит проводить выбор методов испытания более корректно, что безусловно значительно повысит достоверность результатов испытаний и эффективность исследований.

Литература

1. Прочность материалов и конструкций / отв. ред. В.Т. Троценко. – К. : Академперіодика, 2006. – 1076 с.
2. Аппен, А.А. О теоретических критериях адгезии покрытий в металлах / А.А. Аппен // Неорганические и органические покрытия. – Л. : 1975. – С 3–11.
3. Уманский, Э.С. О применении различных теорий адгезии к жаростойким покрытиям / Э.С. Уманский, Б.А. Ляшенко, В.В. Ришин и др. // Защитные покрытия на металлах : респ. межвед. сб. – К. : Наук. думка, 1978. – Вып.12. – С. 16–24.

Шкурко В.В., Хейфец И.М. Институт подготовки научных кадров НАН Беларуси, Минск,
Алексеева Т.А. Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА С ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Управление качеством выпускаемой продукции и ремонтируемых изделий происходит путем определения контролируемых характеристик датчиками контрольно-измерительных приборов с последующей обработкой цифровой информации программируемыми промышленными контроллерами.

Затем собранная информация поступает для анализа и управления на компьютеры, которые могут интегрироваться в локальную или глобальную сеть и использоваться для удаленного управления или накопления в базах данных с использованием облачных технологий. Современные технические средства для статистического управления качеством продукции включают приборы с программным обеспечением, предназначенные для определения физико-механических характеристик материала, геометрических характеристик поверхностей и комплексных характеристик, описывающих надежность изделий при их износе после выпуска продукции или после ее ремонта.

Определение объектов и процессов исследования для управления качеством продукции. На предприятии прежде всего требуется определить процессы производства, результаты которых не могут быть проверены с помощью последующего мониторинга и измерений. К ним относятся процессы, недостатки которых становятся очевидными только после начала использования продукции.

Поэтому на предприятии прежде всего необходимо определить перечень специальных процессов, установить методы их оценки с точки зрения достижения планируемых результатов. Проводится это путем определения требований к оборудованию и персоналу, методикам подтверждения качества и управления специальными

процессами, используя специализированные методы измерения и контроля, формы и порядок регистрации параметров качества.

Твердомеры и микротвердомеры с программным управлением. Твердомеры и микротвердомеры – стационарные и переносные приборы, предназначенные для определения физико-механических характеристик поверхностных слоев материалов – твердости различными методами измерений с использованием разнообразных инденторов, при определенных программах нагружений.

Анализа приборов, используемых методов измерений и программного обеспечения для контроля твердости поверхности позволил заключить, что ведущие мировые производители обычно используют свои разработки программного обеспечения, адаптированные под выпускаемые серии приборов.

Однако, с учетом наибольшей частоты использования американских стандартов измерения твердости ряд других производителей использует программное обеспечение DiaMet фирмы разработчика BUEHLER (США).

Профилометры, профилографы и контурографы с программным управлением. Для измерения геометрических характеристик поверхности изделия используются различные приборы в стационарном и переносном исполнении.

Контроль шероховатости и волнистости поверхности в зависимости от численного или графического представления результатов измерений проводят с помощью профилометров или профилографов, а также профилометров-профилографов. Контроль различных отклонений профиля поверхности изделия проводят контурографом или комбинированным прибором.

Анализ характеристик приборов и программного обеспечения для контроля геометрических параметров качества поверхности от ведущих мировых производителей показывает, что только для стационарных приборов используется совместимое с Windows внешнее программное обеспечение, чаще всего системы типа FORMTRACERAK – 6000 на базе SurfaceXplorer.

Для переносных приборов применяются встроенное программное обеспечение, поставляемое в комплекте на дисках или распространяемое по сети.

Трибометры и машины трения с программным управлением. Трибометры и машины трения – контрольно-измерительное оборудование, предназначенное для исследования трибологических ха-

рактик поверхностей и определения износа поверхностных слоев материалов изделий при различных схемах контактного нагружения пар трения.

Наиболее распространённое программное обеспечение для стационарных машин – Tribbox на базе Windows.

Таким образом, проведен анализ специализированных технических средств с программным обеспечением для контроля и управления качеством продукции, включающих приборы, предназначенные для определения физико-механических характеристик материала (чаще всего твердости и степени упрочнения), геометрических характеристик поверхностей (шероховатости, волнистости, отклонений профиля) и комплексных характеристик (трибологических и прочностных), описывающих надежность и исчерпание ресурса изделий при износе после выпуска продукции или после ее ремонта.

Ющенко К.А., Яровицин О.В., Фомакин О.О.
Институт телеконтрольного сваривания ім. Є.О. Патона
НАН України, Київ, Україна

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ МІКРОПЛАЗМОВОГО ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ З ВАЖКОЗВАРЮВАНИХ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України для вирішення задач електродугового наплавлення з метою відновлення конструктивної форми та експлуатаційних властивостей відповідальних деталей з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів (НЖС) розроблено процес мікроплазмового порошкового наплавлення (МПН) на струмі до 35 А. Процес МПН в комплексі з технологічними процесами прецизійної механічної обробки, вакуумної термічної обробки та відновлення захисних покриттів дозволяє отримувати високоякісний кінцевий продукт у вигляді відновленої деталі авіаційного ГТД з гарантованим відпрацюванням наступного міжремонтного ресурсу.

Досвід тривалого використання процесу МПН на вітчизняних підприємствах при серійному ремонті робочих лопаток ГТД зі сплавів ЖС26, ЖС32, ЖС6К на українських підприємствах (ДП ЗМКБ «Прогрес» ім. акад. О.Г. Івченка – з 2005 р.; АТ «Мотор Січ» – з 2008 р.; ДП ЛРЗ «Мотор» – з 2015 р.) показав, що він може успішно конкурувати з процесом лазерно-порошкового наплавлення, що переважно застосовується за кордоном. В першу чергу – за рахунок меншої у 5–10 разів вартості спеціалізованого обладнання і можливості реалізації процесу МПН в ручному режимі.

Сучасний комплекс технологічних вимог до процесу МПН кромки робочих і соплових лопаток авіаційних ГТД з важкозварюваних НЖС, сформований на основі досвіду багаторічного його використання на провідних авіаремонтних підприємствах України, втілено у новому поколінні спеціалізованого вітчизняного обладнання для МПН (рис. 1) – установці МСТ-50 спільного виробництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона та «ДЗЗУ ім. Є.О. Патона» (торгова марка «Патон»). Спеціалізація цього обладнання – відновлення експлуатаційних пошкоджень кромки деталей з важкозварюваних ЖНС багатоповітряним наплавленням з об'ємом наплавленого металу до 20 см³. МСТ-50 дозволяє забезпечити раціональний вибір технологічних газів в системі $Ar \rightarrow 90\%Ar+10\%N_2$; задавати синергетичні режими на базі декількох типів форми імпульсного зварювального струму з глибиною регулювання 5–10 та індивідуальними амплітудно-частотними параметрами струму та подавання порошку в діапазоні 0–75 г/хв. Автором, який пака за ви, що установка МСТ-50 за сукупністю своїх технічних характеристик і технологічних можливостей не тільки не поступається відомим у вітчизняній промисловості аналогам західного виробництва, але у ряді випадків перевищує їх за ефективністю керування процесом МПН в реальних умовах і впроваджених на вітчизняних авіаремонтних заводах технологічних рішень належать технологічні процеси ремонту МПН робочих лопаток ТВТ і ТСТ зі сплавів типу ЖС6 та ЖС32 – бандажованих (з прямим і Z-подібним профілем торців бандажних полиць, рис. 1, д, е) та небандажованих (відновлення всієї поверхні торця пера або окремо її ущільнюючого елемента, рис. 1, є, ж, з). Недавніми розробками із застосування МПН є технології відновлення робочих відновлення конструктивних елементів статорних деталей ГТД з об'ємом наплавлення більше 2 см³, що передбачають

використання наплавленого металу з рівнем жароміцності більше 100 МПа при 1000 °С: секторів соплових лопаток зі сплаву ЖС6К та ступок реактивного сопла зі сплаву ЖС3ДК.

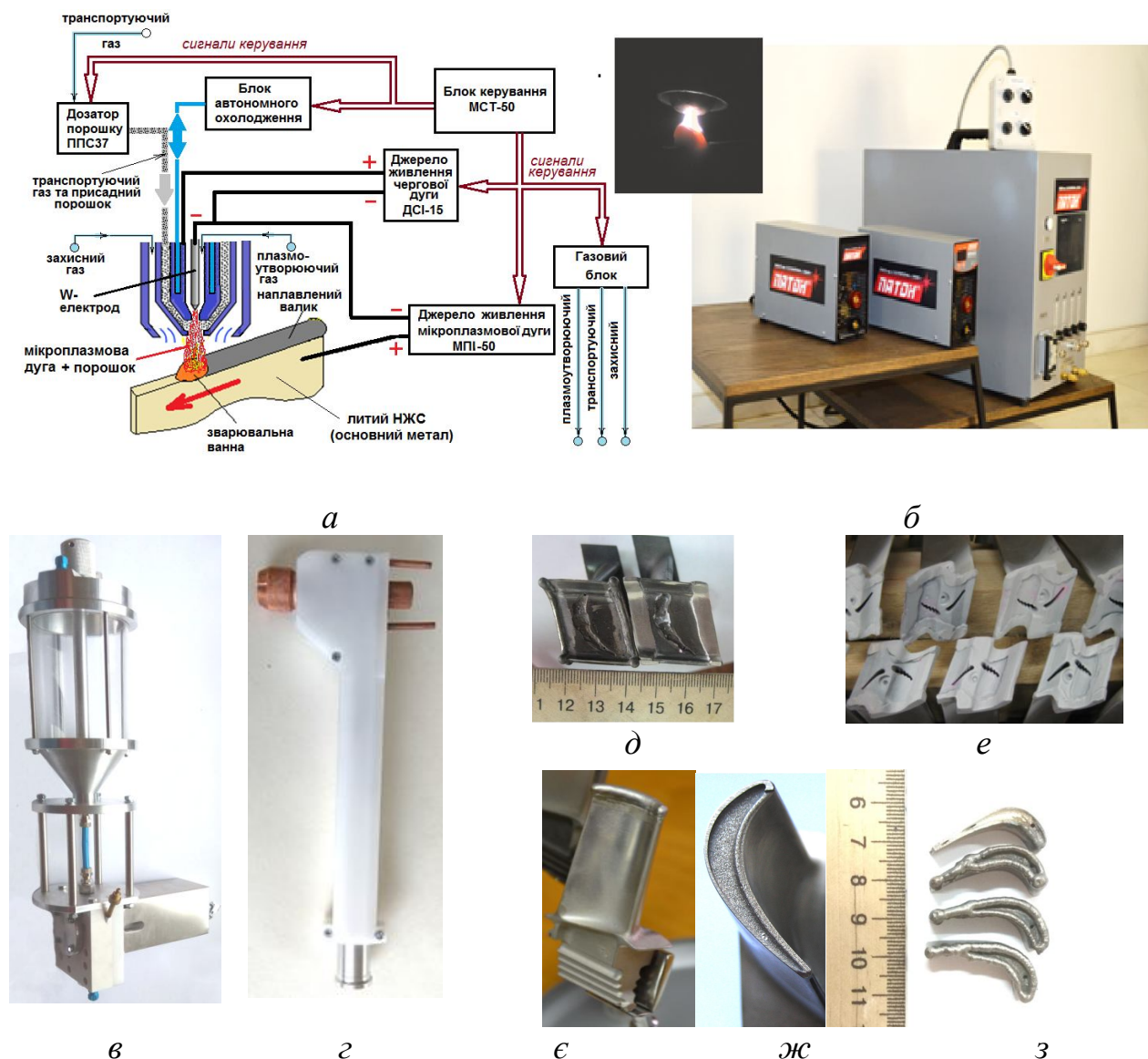


Рис. 1 – Схема процесу МПН, особливості устрою та зовнішнього вигляду складових нового технологічного обладнання МСТ-50 (а-г) і основні типові приклади його практичного застосування при відновленні робочих лопаток з важко зварюваних НЖС типу ЖС6 та ЖС32 (д-з)

Додатково слід зазначити, що невеликі габарити, вага та блочно-модульна система побудови установки МСТ-50 забезпечує мобільність, що дозволяє її використовувати для ремонту звичайних деталей і елементів обладнання, зокрема – в місцях їх безпосереднього розташування.

Яценко І.В., Ващенко В.А., Колінько С.О., Бутенко Т.І.

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси,
Антонюк В.С. Київський політехнічний
інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна,
Кириченко О.В. Інститут пожежної безпеки
ім. Героїв Чорнобиля Національного університету
цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ТА ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ПОВЕРХНЯХ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННО- ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Для підвищення зносостійкості, зниження радіаційної та конвективної складових теплових втрат на оптичні елементи точного приладобудування наносяться нанорозмірні оксидні покриття, що являють собою композиції оксидів SnO_2 , Bi_2O_3 , TiO_2 , ZnO , SiO_2 , Al_2O_3 .

Одним з методів отримання таких покриттів, що широко використовується, є метод термовакuumного осадження матеріалів, який дозволяє отримати нанорозмірні (< 100 нм) покриття у вигляді окремих шарів. При цьому отримані покриття є неоднорідними, містять приховані мікродфекти (тріщини, відколи тощо), поверхня містить значні мікрошорсткості та низьку мікротвердість тощо. Все це призводить до зниження функціональних характеристик цих покриттів: зменшується їх зносостійкість; скорочуються строки їх експлуатації. Для усунення вказаних недоліків та підвищення якості вказаних покриттів було використано їх фінішну електронно-променевоу обробку. В результаті проведених досліджень на зразках з оптичного скла К8 (використовувались пластини довжиною $6 \cdot 10^{-2}$ м, шириною $3 \cdot 10^{-2}$ м та товщиною $4 \cdot 10^{-3}$ м) встановлено, що після електронно-променевої обробки оксидних покриттів не спостерігаються негативні мікродфекти, а мікрошорсткості зменшуються з 30–35 нм до 9–15 нм (рис. 1, 2).

Проведені дослідження мікротвердості поверхні оптичних елементів з оксидними покриттями показали її збільшення після електронно-променевої обробки: від 21,5–17,5 ГПа до 24,9–23,7 ГПа для покриття Al_2O_3 ; від 13,1–9,3 ГПа до 15,9–14,7 ГПа для покриття ZnO_2 ; від 3,5–2,3 ГПа до 7,1–6,3 ГПа для покриття TiO_2 (рис. 3). При цьому для покриттів, які оброблені електронним променем, вплив їх товщини на величину мікротвердості поверхні послаблюється на 30–40%.

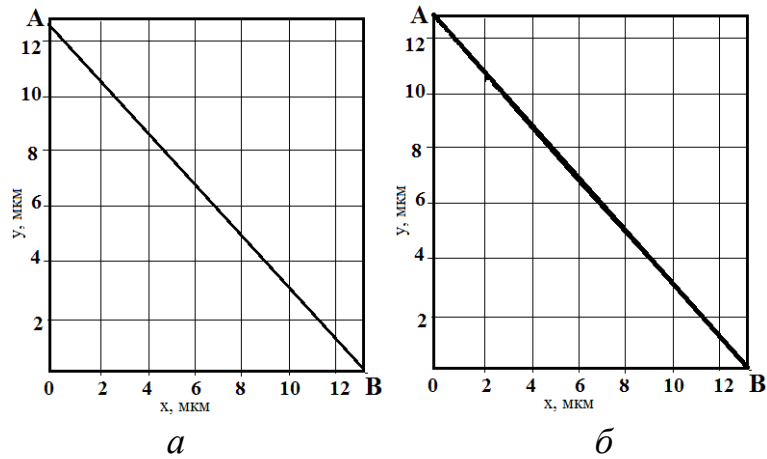


Рис. 1 – Топограма ділянки поверхні (13×13 мкм) оптичного елемента з покриттям TiO_2 до (а) та після (б) електронно-променевої обробки

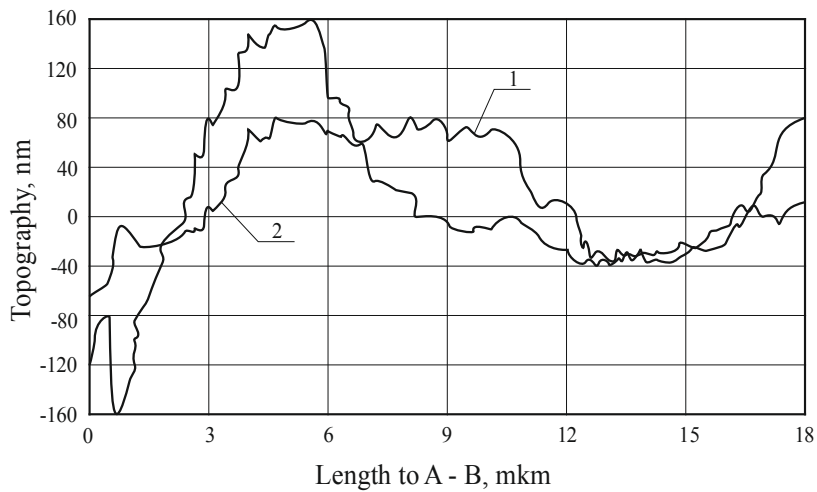


Рис. 2 – Топограма вздовж лінії А–В ділянки поверхні (13×13 мкм) оптичного елемента з покриттям TiO_2 до (1) та після (2) електронно-променевої обробки

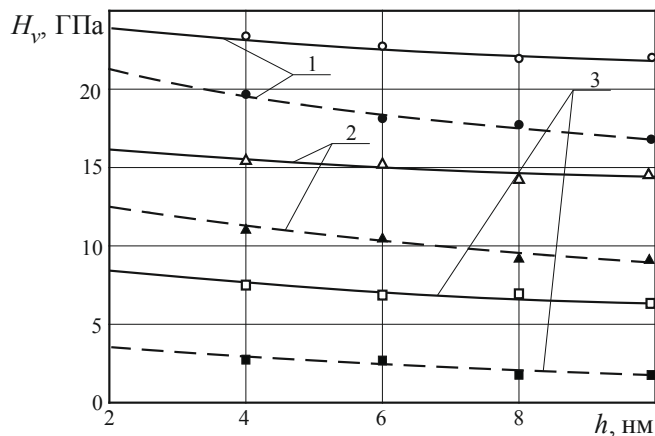


Рис. 3 – Залежності мікротвердості поверхні оптичних елементів з оксидними покриттями Al_2O_3 (1), ZrO_2 (2) та TiO_2 (3) від їх товщини: ———— — після електронно-променевої обробки; - - - - до електронно-променевої обробки; Δ , \circ , \square , \blacktriangle , \blacksquare , \bullet – експериментальні дані

Встановлено, що після електронно-променевої обробки оксидних покриттів на оптичних елементах строк їх експлуатації збільшується на 20–30%. При цьому зменшується на пористість поверхні 5–10% та підвищується на 7–12% їх зносостійкість.

Таким чином, отримані результати досліджень з функціональних характеристик нанорозмірних оксидних покриттів на оптичних елементах показали необхідність подальшого розвитку електронно-променевої технології у оптико-електронному приладобудуванні за вказаними напрямками.

Література

1. Vashchenko, V.A. Osnovy elektronnoi pbrobky vyrobiv z optychnykh materialiv [The basics of electronic processing of optical materials] / V.A. Vashchenko, I.V. Yatsenko, Y.G. Lega, O.V. Kirichenko. – К. : Nauk. Dumka, 2011.

2. Okatov, M.A. Spravochnik optika-tekhnologa [Optician Technologist Handbook] / M.A. Okatov, E.A. Antonov, A.B. Baygozhin. – St. Petersburg : Polytechnic, 2004.

3. Yatsenko, I.V. / I.V. Yatsenko, M.A. Okatov, E.A. Antonov et al. // J. Nano- Electron. Phys. – 2018. – 10(4). – 04028.

4. Yatsenko, I.V. / I.V. Yatsenko, V.S. Antonyuk, V.A. Vashchenko et al. // J. Nano- Electron. Phys. – 2019. – 011(2). – 02014.

Бондаренко Ю.К., Ковальчук О.В, Артюх К.О.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ РИЗИКІВ НА ТЕХНІЧНУ БЕЗПЕКУ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СТАНДАРТУ ДСТУ ISO 9001:2015 В ПРОМИСЛОВОСТІ

Згідно обов'язкових вимог технічних регламентів до технічної документації на відповідальну продукцію зварювального виробництва, технічна документація повинна давати можливість оцінити відповідність продукції нормативним вимогам і включати опис проведення і результати належного аналізу та оцінки ризику (ризиків). На

даний час достовірна методика оцінювання ризику зварної конструкції відсутня. В статті визначено особливості виникнення ризиків протягом життєвого циклу продукції. Розглянуто алгоритм виникнення складових ризику при експлуатації зварної конструкції, який є сумарною як ризиків пов'язаних з відхиленнями процесів проектування, виготовлення, експлуатації (іншими словами, пов'язані з процесами життєвого циклу продукції) так і ризиків, пов'язаних з небезпеками які виникають від дій на конструкції та імовірністю експлуатації конструкції поза межами призначення. Відзначено, що ризик при експлуатації є імовірність досягнення конструкцією граничного стану протягом визначеного періоду експлуатації. При цьому граничні стани підрозділяються на дві групи. До першої групи належать граничні стани перехід через які призводить до повної непридатності об'єкта. До другої групи відносяться ті, які ускладнюють нормальну експлуатацію об'єкта або зменшують його довговічність порівняно з встановленим терміном. При експлуатації зварна металева будівельна конструкція зазнає, насамперед, механічних і корозійних впливів. Дано посилання на теорії та наведено формули які визначають імовірності відмови металевої конструкції. Рекомендовано про розрахунок сумарної величини ризику експлуатації користуватись формулою Байеса.

Кожен виробник зварної конструкції має на меті випустити продукцію належної якості, задовольнити споживача, зацікавити нових покупців, інвесторів і при цьому виконати обов'язкові законодавчі нормативні вимоги, які до неї ставляться. На даний час обов'язкові технічні вимоги до відповідальної зварювальної продукції визначені Технічними регламентами, та конкретизовані стандартами, переліки яких затверджені відповідними наказами Міністерства економічного розвитку та торгівлі України.

Проте, в реальному житті, виробники зварних конструкцій стикаються з рядом небезпек, які можуть негативно впливати на виробництво і бути причиною випуску бракованої продукції, зниження обсягу випуску, втрачання ринку та інше. Небезпеки (небезпечні фактори) можуть мати по відношенню до виробництва як зовнішнє так і внутрішнє походження. Небезпеки породжують ряд невизначеностей щодо того, чи зможе виробництво досягнути поставлених цільових показників і у який термін. Такий вплив невизначеностей на цілі і розглядається як ризики.

Дійсно, за визначенням, згідно стандарту ДСТУ ISO/IEC Guide 73:2013 «Керування ризиками. Словник термінів», термін ризик визначається як вплив невизначеності на цілі.

Вплив розглядається як відхилення з позитивними і негативними наслідками. Цілі можуть мати різні аспекти (такі як фінансові аспекти, які стосуються професійної безпеки та здоров'я, екологічні завдання) і можуть відноситись до різних рівнів (таким як стратегічний рівень, організаційний, рівень проекту, продукції, процесу). Ризик часто характеризується посиланнями на потенційно можливі події і наслідки або їх комбінацій. Ризик часто виражається в комбінації події і пов'язаної з нею імовірності інцидентів (аварій, невідповідностей вимогам нормативних документів). Невизначеність – це стан, також часткової, відсутності інформації відносно розуміння чи знання подій, його наслідків або імовірності.

Підприємство ідентифікує ризики, аналізує, оцінює ризики і приймає рішення чи слід змінювати ризик шляхом його обробки чи слід прийняти його. Якщо такий процес керування конкретними ризиками інтегрований в загальну систему управління на підприємстві – це означає що підприємство впроваджує менеджмент ризику. При цьому об'єктами менеджменту ризику є як система управління в цілому, її процеси так і конкретні проекти, процеси, продукція. Всі складові менеджменту пов'язані між собою. Дійсно, результатом якісних технологічних процесів (процесів, яких ризик визначено і утримується на прийнятному рівні) є якісна продукція (та яка несе в собі мінімальний визначений прийнятний ризик). І навпаки, не можна отримувати якісну продукцію, якщо виробничі процеси містять значні невизначеності. Сучасна організація управління підприємством будується на принципах ризик-орієнтованого підходу і визначає залежність ступеню регулювання процесів від ризиків (невизначеностей) які з процесами пов'язані.

Важливою складовою керування ризиком і менеджменту ризиком, в цілому, є впровадження моніторингу в тому числі оцінювання якості продукції методами неруйнівного контролю і технічної діагностики. Контроль, з точки зору ризик-орієнтованого підходу, має щодо ризику вирішальне значення. Контроль є діяльність яка визначає стан ризику конструкції, і за результатами контролю розробляються дії з обробки ризику з метою зменшення його ступеню.

Технічний регламент встановлює основні вимоги до безпеки, проектування, виготовлення, оцінки відповідності, маркування та

введення в дію продукції а також визначає порядок нагляду за дотриманням зазначених вимог.

Згідно Технічних регламентів встановлені наступні вимоги до технічної документації щодо проектування та розроблення продукції: «Виробник розробляє технічну документацію, яка повинна давати можливість оцінити відповідність продукції відповідним вимогам і включати опис проведення і результати належного аналізу та оцінки ризику (ризиків). У технічній документації повинні зазначатися застосовні вимоги та пов'язані з проведенням оцінки відповідності питання проектування, виробництва і функціонування продукції. Технічна документація повинна у відповідних випадках містити відповідні елементи.

Висновки:

1) Побудовано алгоритм виникнення ризику при експлуатації будівельної конструкції. Запропоновано процесний підхід з метою аналізу відхилення процесів проектування, виробництва та обслуговування.

2) Визначено показники граничних станів зварної конструкції від механічних дій та показники якості корозійних впливів. Підібрано розрахункові формули швидкості(імовірності) досягнення граничних станів від механічних дій. Для аналізування комбінації дій рекомендовано застосовувати метод сіток Баеса.

3) Встановлено, що одним з основних завдань системи менеджменту якості зварювального виробництва згідно ДСТУ ISO 9001:2015 є забезпечення виявлення потенційних невідповідностей в системі зварювального виробництва і попередження їх виявлення за допомогою менеджменту ризику. Відхилення процесів системи менеджменту є причинами утворення браку продукції, що випускається та виникнення ризику аварійної ситуації на виробництві.

4) Успіх менеджменту ризиків буде залежить від результативності структури менеджменту, яка забезпечує обґрунтування і заходи, які інтегрують його по всьому зварювальному підприємству по всім рівням.

СОДЕРЖАНИЕ

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ 3

Агеев М.С., Рутковский А.В., Соловых Е.К., Катеринич С.Е., Белоцерковский М.А.

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ АЗОТИРОВАНИЕМ 5

Базров Б.М., Чижик С.А., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 10

Береснев В.М., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю., Манохін А.С.

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ 12

Бурыкин В.В., Муковоз С.Ю.

ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОЛИМЕРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ 15

Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Аббасов К.Т., Хеук М.В.

К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ТЕЛ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА 19

Гонтар О.Г., Копейкіна М.Ю., Дабіжа Є.В., Береснев В.М., Васильев В.В., Стрельницький В.Є., Погрелюк І.М., Дейнека О.В.

СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВАКУУМНИХ ПЛАЗМОВИХ І ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ШИРОКОГО СПЕКТРУ ЗАСТОСУВАННЯ 22

Домулажанов И.Х., Домуладжанова Ш.И., Латипова М.И., Турдалиева М.М.

АНАЛИЗ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО ЦЕХА 25

Иванов А.А., Присяжнюк П.Н., Луцак Д.Л.

ПОВЫШЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАПЛАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ НА ОСНОВЕ БОРИДОВ/КАРБИДОВ МЕТАЛЛОВ 31

Ivanov V., Lavrova E.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE MECHANICAL VIBRATIONS OF THE STRIP ELECTRODE ON THE TRANSFER PROCESS OF THE ELECTRODE METAL DURING ELECTRIC ARC SURFACING

35

Калашиников И.Е., Быков П.А., Кобелева Л.И., Колмаков А.Г., Михеев Р.С., Хейфец М.Л., Клименко С.А., Копейкина М.Ю.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ SN-SB-CU, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СУБМИКРОННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

37

Ковальов М.Ф., Головащук М.В., Кулижський В.М., Лопата В.М., Ніколайчук В.Я.

ЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ВІДНОВЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЇХ ЯКОСТІ І РЕСУРСУ ВІДРЕМОНТОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

40

Колесник М.А., Крикун К.П.

СУТНІСТЬ ПРИНЦИПУ УЗГОДЖЕННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДЕТАЛЕЙ ЦПГ

43

Коломиец В.В., Ридный Р.В., Карпов Д.В.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗЦОВ ИЗ ПСТМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА БОРА

45

Копылов В.И., Ерко А.А., Кузин О.А., Кузин Н.О.

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ НА РАЗРУШЕНИЕ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ИЗНОСА

49

Коржов В.П., Зверев В.Н.

МНОГОСЛОЙНАЯ ЛЕНТА ИЗ (Nb–Ti)-СПЛАВА ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МЕДИЦИНСКИХ МР-ТОМОГРАФОВ

52

Кутепов А.Ю., Крень А.П., Гнутенко Е.В.

ИНДИКАЦИЯ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ

56

Лавріненко В.І.

ДО ПИТАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОКРИТТЯ ЗЕРЕН НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ У ШЛІФУВАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ

59

<i>Ланцман Г.А., Крень А.П.</i> НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУГУНА	63
<i>Лебедев В.Г., Фроленкова О.В.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПЫЛЕННОГО ТЕРМОБАРЬЕРНОГО СЛОЯ $ZrO_2+Y_2O_3$ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЭЛЬБОРОВЫМИ КРУГАМИ	65
<i>Лецинский Л.К., Иванов В.П., Возьянов Е.И.</i> СНИЖЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ИЗНОСА НАПЛАВЛЕННЫХ РОЛИКОВ МНЛЗ	68
<i>Лецинский Л.К., Матвиенко В.Н., Степнов К.К., Возьянов Е.И. Карауланов О.В.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ И РОЛИКОВ МНЛЗ	70
<i>Лойко В.А., Ивашко В.С.</i> НАНЕСЕНИЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОТВЕТСТВЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ АВТОМОБИЛЕЙ	71
<i>Ночвай В.М., Полонський Л.Г., Головня В.Д.</i> ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО СПРАЦЮВАННЯ	74
<i>Письменный О.С., Прокоф'єв О.С., Римар С.В., Пантелеймонов Є.О., Губатюк Р.С.</i> СТИКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ-ПАЯННЯ ТРУБ З ПРИКЛАДАННЯМ ТИСКУ ІЗ ЕМАЛЬОВАНИМ І СКЛЯНИМ ВНУТРІШНІМ ПОКРИТТЯМ	75
<i>Польский Е.А., Осипова Е.С., Михневич Д.Н.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ОСНАСТКИ ПРЕСС-ФОРМ	78
<i>Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Аксьом П.А.</i> ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ СТАЛІ ПРИ МАГНІТНИХ ПЕРЕТВОРЕННЯХ	80

<i>Присяжнюк П.М., Шлапак Л.С., Андрусихин Р.В., Семяник І.М., Трощук Л.Л.</i>	
АНАЛІЗ ВПЛИВУ КРЕМНІЮ НА КРИСТАЛІЧНУ СТРУКТУРУ ТА ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ МАРГАНЦЕВОГО АУСТЕНІТУ	83
<i>Прохоров Д.В., Коржов В.П.</i>	
СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖАРОПРОЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ №–V	86
<i>Роянов В.А., Захарова И.В.</i>	
КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ І КІЛЬКОСТІ КИСНЮ У ПУЛЬСУЮЧОМУ РОЗПИЛЮВАЛЬНОМУ СТРУМЕНІ ПРИ ДУГОВІЙ МЕТАЛІЗАЦІЇ	89
<i>Роянов В.А., Захарова И.В., Крючков Н.С.</i>	
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА НА ДИСПЕРСНОСТЬ ЧАСТИЦ ПРИ ДУГОВОМ НАПЫЛЕНИИ	91
<i>Рябченко С.В.</i>	
ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРОФИЛЬНЫМИ КРУГАМИ ИЗ ХРОМИСТОГО КОРУНДА	93
<i>Сазонов М.И., Хвиевич В.М., Веремейчик А.И., Кондратюк В.О., Старикевич М.О.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ДРОБИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ПОСЛЕ ОБЪЕМНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ	95
<i>Саленко А.Ф., Елизаров М.А., Щетинин В.Т., Лашко Е.Е., Аль-Кураан Тарек М.А., Клименко С.А.</i>	
ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ХЕМОГРАФИИ	97
<i>Саленко О.Ф., Шепеленко І.В., Будар Мохамед Р.Ф.</i>	
ФОРМУВАННЯ АЛМАЗОВМІСНИХ ШАРІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ ІНСТРУМЕНТУ	100
<i>Сахнюк І.О., Битков М.Х., Рудак Н.П. Поліщук Р.Ю.</i>	
ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ І ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ В НАУКОВИХ УСТАНОВАХ	103
<i>Сенють В.Т.</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ТЕРМОБАРИЧЕСКОГО СПЕКАНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ	106

<i>Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Хейфец М.Л., Клименко С.А., Копейкина М.Ю.</i> ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПРИГРАНИЧНЫХ ЗОН БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ	109
<i>Сёмин Е.В., Лойко В.А., Ивашко В.С.</i> ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ НА СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕТАЛЛА В ПОКРЫТИИ	111
<i>Соломахо В.Л., Цитович Б.В.</i> ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ	114
<i>Тимофеев С.С., Воскобойников Д.Г., Колесник М.А.</i> СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ	116
<i>Тимофеева Л.А., Букін Р.В., Титар Д.М.</i> ОЦІНКА ЯКОСТІ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ ПРИ РЕНОВАЦІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	117
<i>Трембач Б. О., Гринь О.Г.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАВАННЯ МІДІ (Cu) НА ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ СИСТЕМИ Fe-C-Cr-Ti-V-Al	119
<i>Тришин П.Р., Гончар Н.В.</i> ВПЛИВ НАКЛЕПУ ПРИ ФІНІШНІЙ ОБРОБЦІ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ РОБОЧОГО ШАРУ КАНАЛУ ХВИЛЕВОДІВ	123
<i>Уваров В.А., Громовий О.А.</i> ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПІДШИПНИКІВ ЗА РАХУНОК ПЛАЗМОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ	125
<i>Федченко І.І., Грибанов М.В., Цап О.І.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ТЕРТЯ	128
<i>Фідровська Н.М., Чернищенко О.В., Хурсенко С.О.</i> ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ЛОБОВИНИ КРАНОВОГО БАРАБАНУ	130

<i>Харламов Ю.А.</i> МЕТОДЫ ТЕКСТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ	132
<i>Харламов Ю.А.</i> УЧЕТ УСЛОВИЙ ИЗНАШИВАНИЯ СОПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИХ УПРОЧНЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ	137
<i>Харламов Ю.А., Клименко С.А.</i> ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ	142
<i>Хейфец М.Л.</i> Институт прикладной физики НАН Беларуси, <i>Баранов Ф.Л., Гутковский А.И.</i> ООО «БСВТ-новые технологии» <i>Бородавко В.И., Грецкий Н.Л.</i> ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, <i>Хилько Д.Н.</i> ООО «ШТРАБАГ Инжиниринг Центр», Минск, Беларусь КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ ФЕРРОПОРОШКОВ В СОЧЕТАНИИ С ПОВЕРХНОСТНО- ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ	147
<i>Хилько Д.Н.</i> ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА ФЕРРОПОРОШКОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ НА ПЛОСКИЕ РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ	150
<i>Циганчук В.В., Шлапак Л.С., Матвієнків О.М.</i> КОНТРОЛЬ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗАСОБАМИ	153
<i>Черновол М.И., Лопата Л.А., Кобзарь В.Л., Лопата А.В., Смирнов И.В., Дудан А.В.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЙ	155
<i>Шкурко В.В., Хейфец И.М., Алексеева Т.А.</i> ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА С ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ	161
<i>Ющенко К.А., Яровицин О.В., Фомакін О.О.</i> РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ МІКРОПЛАЗМОВОГО ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ З ВАЖКОЗВАРЮВАНИХ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ	163

*Яценко І.В., Ващенко В.А., Колінько С.О., Бутенко Т.І., Антонюк В.С.,
Кириченко О.В.*

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ТА ЗНОСОСТІЙКИХ
ПОКРИТТІВ НА ПОВЕРХНЯХ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА
ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

166

Бондаренко Ю.К., Ковальчук О.В., Артюх К.О. Інститут електрозварю-
вання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ РИЗИКІВ НА ТЕХНІЧНУ
БЕЗПЕКУ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІСЛЯ
ВПРОВАДЖЕННЯ СТАНДАРТУ ДСТУ ISO 9001:2015 В
ПРОМИСЛОВОСТІ

168

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ

Материалы 20-й Международной научно-технической
конференции,

01–05 июня 2020 г.

Компьютерная верстка: Копейкина М.Ю.

Подписано в печать 25.05.2020

Формат 60×84×1/16. Бумага типографская

Печать офсетная. Уч. изд. л. 16,5.

Тираж 150 экз.

Ассоциация технологов-машиностроителей Украины
04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2