

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

Е.Ю. КАЛИН, канд. техн. наук, доц. И.О. СОКОРОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Демонстрируются высокоэффективные и экономичные технологические процессы восстановления-упрочнения деталей оборудования комбинированными методами инженерии поверхностей, обеспечивающие повышение ресурса и улучшение служебных характеристик. Объектом исследования являются детали технологического оборудования, материалы для упрочнения-восстановления деталей и технологии их нанесения. Проанализированы результаты исследования микротвердости и структуры напыленных покрытий после оплавления. Рассмотрены методики исследования физико-механических свойств поверхностных слоев, формируемых методами газотермического напыления.

Введение. Одной из актуальных задач в легкой промышленности является кардинальное повышение ресурса и улучшение служебных характеристик различных технологических систем. Пути решения этой задачи могут быть весьма разнообразны и определяются в основном тем параметром или группой параметров, которые требуется обеспечить. Анализ существующих на сегодняшний день направлений, связанных с повышением работоспособности различных деталей, показывает, что стремление к повышению их долговечности за счет дальнейшего ужесточения требований к точности геометрических параметров малоэффективно, так как в большинстве случаев приводит к существенному росту технологических издержек на изготовление. Применение новых высокопрочных материалов хотя и способствует росту статической прочности, однако сопровождается существенным ростом себестоимости изделий. Поэтому наиболее эффективным является повышение эксплуатационных свойств деталей технологическими методами.

Анализ различных упрочняющих технологий показывает, что для улучшения несущей способности поверхностного слоя трущихся деталей весьма перспективным может оказаться совместное использование технологий, обеспечивающих максимальную твердость поверхностного слоя и последующее формирование тонкого модифицирующего покрытия из мягких металлов (меди, латуни, бронзы и др.) или полимеров. В соответствии с современными представлениями, тонкий слой подобного покрытия в определенных интервалах нагрузок и температур участвует в создании на поверхности трения субмикроскопической пленки, изолирующей контактирующие поверхности от непосредственного соприкосновения, вследствие чего повышается износостойкость деталей и снижаются потери на трение. Кроме того, находясь на рабочей поверхности, мягкое покрытие облегчает приработку деталей, способствует выравниванию напряжений в зоне контакта и снижению трения благодаря низкому сопротивлению сдвигу и пластическому течению материала покрытия, а также уменьшению влияния микроадгезионных процессов [1].

Учитывая вышесказанное, целью выполненных исследований являлось изучение условий эксплуатации деталей технологического оборудования легкой промышленности, проведение патентных исследований по выбору материалов и режимов формирования покрытий при использовании комбинированных схем поверхностного упрочнения.

Основная часть

Методика исследований и использованное оборудование. Подготовка поверхности перед напылением производилась дробеструйной обработкой. Данный метод является наиболее эффективным и производительным, обеспечивающим как очистку поверхности от адсорбированных масляных и оксидных пленок, так и активацию основы вследствие интенсивного перенаклепа [3; 5]. Применялись следующие режимы дробеструйной обработки: давление воздуха 0,6 МПа, диаметр сопла 8 мм, дистанция 40...50 мм. Использовалась чугунная колотая дробь ДЧК-1,8 ГОСТ 11964-81 со средним размером 1,8 мм.

Для плазменного напыления порошков использовалась установка ТРУ-БПИ (рис. 1) с плазмотроном ПП-25. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа применялся МАФ. Давление газа – 0,1 МПа. Напряжение дуги – 85...90 В, сила тока изменялась в пределах 170...400 А.

Толщина напыленного слоя составляла 2,5...3,5 мм. Критерием выбора режимов напыления являлась прочность сцепления покрытия с основой. В качестве оптимальных были выбраны режимы, обеспечивающие получение наибольшей прочности сцепления покрытия с основой.

Основным компонентом установки для плазменного напыления покрытий является плазмотрон, представленный на рисунке 2. Главная часть плазмотрона – сопловой (анодный) узел, включающий системы охлаждения и введения порошка в плазменную струю. Через электроизоляционный блок сопловой узел стыкуется с катодным, который представляет собой стержневой электрод, изготовленный из вольфра-

рама с добавками, и систему его охлаждения. Наибольшему изнашиванию подвергается сопло плазмотрона, поэтому его делают сменным. Срок службы сопла зависит от режима эксплуатации плазмотрона, вида рабочего газа, системы охлаждения и составляет 15...100 ч [6; 7].

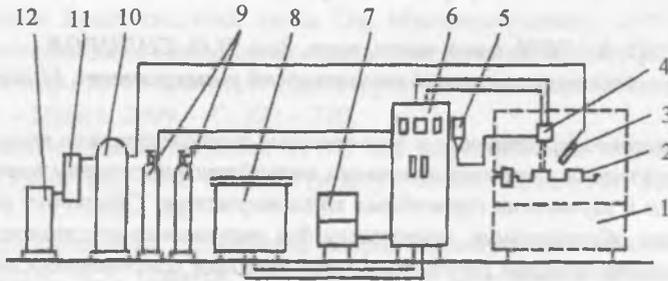


Рис. 1. Схема установки для плазменного напыления:

- 1 – вытяжной шкаф; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – насадка подачи сжатого воздуха для охлаждения детали;
- 4 – плазмотрон; 5 – порошковый питатель; 6 – пульт управления; 7 – устройство подачи охлаждающей воды;
- 8 – источник питания; 9 – баллоны с газами; 10 – ресивер; 11 – масловодоотделитель; 12 – компрессор

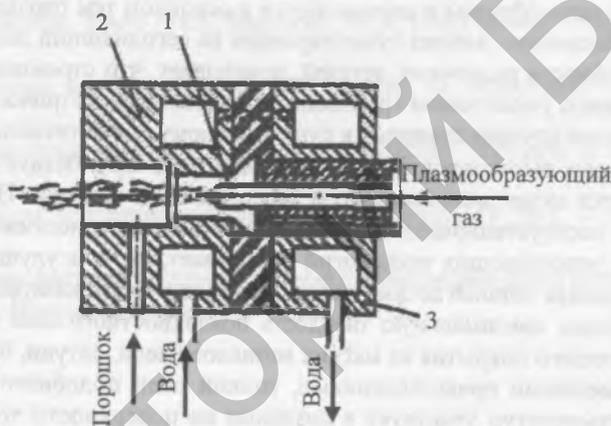


Рис. 2. Схема плазмотрона

Еще одна важная деталь использовавшейся плазменной установки – питатель. Порошковые питатели служат для подачи порошкообразных материалов в плазмотрон. От стабильности работы порошкового питателя во многом зависит качество покрытий. Схема питателя приведена на рисунке 3. Используемый для напыления порошок 1 помещают в бачок 2 на расстоянии около 1 м от плазмотрона. Поток транспортирующего газа, проходящего по эластичной трубке 5, порошок подает к плазмотрону. Газо-порошковая смесь поступает по трубке 7 через отверстие сопла 8 в плазменную струю.

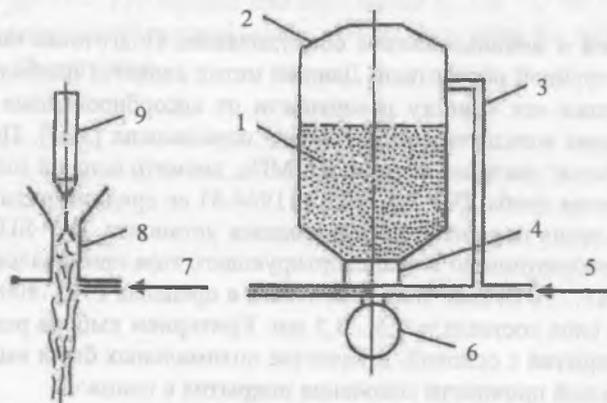


Рис. 3. Схема порошкового питателя:

- 1 – порошок; 2 – бачок; 3 – трубка уравнивания давления; 4 – дозирующее устройство; 5 – трубка ввода транспортирующего газа; 6 – вибратор; 7 – трубка выхода газопорошковой смеси; 8 – сопло; 9 – катод

Подготовка образцов. Для изучения структуры, твердости, пористости плазменных покрытий необходимо изготовление специальных образцов. Они изготавливались в виде поперечного среза. В нашем случае покрытия были средней толщины.

Место вырезки шлифа выбирают так, чтобы образец был достаточно типичен для композиции основной металл – покрытие. При неоднородной структуре образцы вырезают из каждой характерной зоны.

Далее образцы шлифовались бумажными или тканевыми наждачными шкурками. После каждой ступени шлифования проверяли качество поверхности. Вся поверхность шлифа должна быть покрыта царапинами, равномерными по ширине и расположенными на одинаковом расстоянии. Не должно быть следов шлифования более грубой шкуркой (т.е. перпендикулярных рисок). Время шлифования одной шкуркой составляло 5 – 10 мин. На процесс подготовки образца в целом желательно использовать не менее четырех шкурки.

Риски, оставшиеся от шлифования на последней шкурке, устранялись полированием. Для полирования использовали вращающийся металлический диск с натянутой или приклеенной тканью. Паста с дисперсным абразивом подается в зону контакта поверхности образца и ткани. Хорошее качество шлифа достигается при использовании мелкозернистой пасты ГОИ, в состав которой входят оксид хрома, стеарин, керосин, олеиновая кислота и сода.

Окончательная чистка шлифов после полирования включает операции промывки в проточной воде, сушки, обезжиривания этиловым спиртом или эфиром и заключительной сушки в струе теплого воздуха или с помощью фильтровальной бумаги.

Методика оплавления покрытий. Составы исследуемых композиций приведены в таблице.

Композиции для исследования

№ композиции	Состав композиции (в объемных долях)
1	ПТ-НА-01 (1/3) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (2/3)
2	ПТ-ЮНХ16СР3 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
3	ПТ-ЮНХ16СР3 (1/3) + ПГ-19М-01 (2/3)
4	ПТ-НА-01 (1/3) + ПГ-19М-01 (2/5) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/3)
5	ПР-НД42СР (1/3) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/3) + ПТ-НА-01 (1/3)
6	ПТ-19Н-01 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)

Для оплавления покрытий был выбран способ оплавления газопламенной горелкой «Москва-6» со следующими режимами: давление пропан-бутановой смеси 0,15...0,20 МПа; давление кислорода 1,0 МПа.

Оплавление осуществлялось до «запотевания» поверхности (температура 1123...273 К) [7].

Методика сканирующей электронной микроскопии. Растровая (сканирующая) электронная микроскопия в данной работе проводилась на комплексе макро- и микроанализа с цифровой передачей изображения МКИ-2М с наибольшим увеличением 1000 раз и с цифровым разрешением 4,5 млн. мегапикселей. Изображение формируется отраженным светом, который сканирует поверхность образца и попадает в объектив. Исследование материалов с покрытиями с помощью оптических микроскопов также включает оценку структурной неоднородности в поперечных и продольных сечениях покрытий; выделение микроструктуры переходной зоны «покрытие – основной металл»; определение количественных характеристик пористости покрытия; изучение структуры поверхности покрытий и основного металла после предварительной подготовки, анализ изменения рельефа поверхности вследствие изнашивания.

Исследование пористости. Различают три основных метода определения пористости покрытий: гидростатическое взвешивание, микроскопический (металлографический) и ртутной порометрии. Выбор метода измерения пористости зависит от необходимой точности испытаний, наличия соответствующей аппаратуры, количества образцов, особенностей строения покрытия и т.д. На основании данных, полученных этими методами, можно построить геометрическую модель пористой структуры покрытия.

Метод гидростатического взвешивания состоит из следующих основных операций: взвешивание на воздухе, закрытие поверхностных пор, взвешивание в воде, пропитка рабочей жидкостью, взвешивание пропитанных образцов на воздухе и в рабочей жидкости. Пористость рассчитывают по формуле с учетом массы и плотности основного металла. Метод гидростатического взвешивания обеспечивает достаточно надежное определение лишь открытой пористости. Недостаток метода связан с необходимостью знать истинную плотность покрытия, т. е. химический и фазовый составы получаемых покрытий.

В основе микроскопического (металлографического) метода определения пористости лежит первое стереометрическое соотношение, по которому доля фазы (пор) в объеме сплава (покрытия) равна части секущей линии, проходящей через эту фазу (поры) на площади шлифа. Практически необходимо суммиро-

вать длины отрезков, попадающих на поры, а затем, например, для определения общей пористости, результат отнести к общей длине секущих линий [8]. Точность испытаний зависит от суммарной длины секущих.

Объектом исследования служат нетравленные шлифы, которые анализируют при одном и том же увеличении микроскопа. Площадь шлифа покрытия должна быть не менее $0,5 \text{ см}^2$. В качестве секущей удобно использовать окулярную линейку, вставляемую в объектив, осевая линия которой разделена рисками на сто условных единиц. Секущие можно также наносить на микрофотографию структур или на изображения, полученные на матовом стекле микроскопа [9].

Общая пористость определяется по формуле

$$P = \frac{\Sigma l}{L_1} \cdot 100,$$

где l – суммарная длина отрезков, попадающих на поры; L_1 – общая длина секущей линии в условных единицах измерительного прибора.

Микроскопический метод определения пористости дает информацию о пористости только в одном случайном сечении покрытия и не позволяет оценить качество покрытия в объеме. Могут занижаться значения пористости, так как большая часть пор, размер которых меньше 1 мкм , при анализе не фиксируется. Точность оценки пористости данным методом в несколько раз ниже, а трудоемкость выше, чем у метода гидростатического взвешивания.

Взвесив все возможности и недостатки методов, пористость определяли металлографическим методом на микроскопе МКИ-2М при увеличении $\times 1000$ с полуавтоматическим анализатором изображения NICON на поверхности.

Исследование микротвердости. Основным физико-механическим свойством упрочненного слоя, определяющим его эксплуатационные характеристики, в первую очередь износостойкость, является микротвердость. Испытания ее производились при помощи микротвердомера ПМТ-3 по стандартной методике при значении статической нагрузки $0,981 \text{ Н}$.

Если при испытаниях хрупких покрытий на поверхности отпечатка или на прилегающих к нему участках обнаружены сколы и трещины, результаты не учитываются.

Значение микротвердости определяется по формуле

$$H_{\mu} = \frac{1854 \cdot 10^4}{(k \cdot d)^2}, \text{ ГПа},$$

где P – нагрузка, г; d – диагональ отпечатка, делений; k – индивидуальный коэффициент прибора, $k = 0,3$.

Методика определения прочности сцепления покрытия с основой. Прочность сцепления напыленных покрытий с основой определяли штифтовым методом (рис. 4). Применявшийся метод основан на непосредственном определении силы, направленной перпендикулярно к напыленной поверхности и отрывающей покрытие от основного материала.

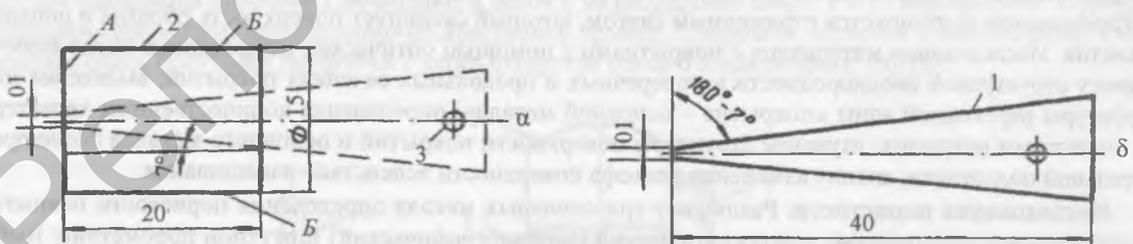


Рис. 4. Образец для определения прочности сцепления штифтовым методом

Детали 1 и 2 подгоняли друг к другу, притирали, поверхность А шлифовали в приспособлении. Штифт 1 проворачивали в тонкопластинчатой головке 2 для устранения погрешностей. Поверхность А готовили к напылению по той технологии, которая предусмотрена для данного вида покрытия. Вначале обезжиривали поверхность этиловым спиртом, затем производили обдувку дробью. После дробеструйной обработки штифт проворачивали в приспособлении для устранения погрешности. Порошковый сплав напыляли на поверхность А образца вместе с приспособлением.

Для определения прочности сцепления использовали разрывную машину «Instron» английской фирмы «Кэмбридж инструментс». Применялась минимальная скорость нагружения, обеспечивающая статический характер нагрузки.

Прочность сцепления и площадь торцевой поверхности штифта определялись по формулам:

$$\sigma_{сч} = \frac{P_{отпр}}{A};$$

$$A = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}.$$

Дополнительно для исследования прочности сцепления покрытия с основой были проведены испытания на машине трения СМТ-2070, суть которых заключалась в том, что при действии разрушающей нагрузки происходило отслаивание покрытий от основы. Это проводилось для полного определения эксплуатационных свойств покрытий.

Исследование структуры покрытий

Структуры покрытий, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 5.



Композиция № 1



Композиция № 2



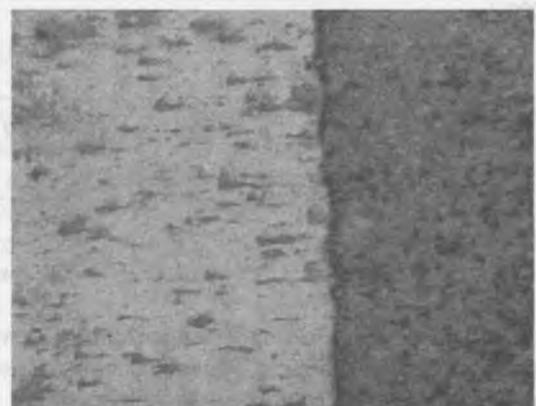
Композиция № 3



Композиция № 4



Композиция № 5



Композиция № 6

Рис. 5. Микроструктура покрытий

Как видно из представленных снимков, у оплавленных покрытий граница покрытия и основы является менее выраженной. Наблюдается переходная зона, состоящая из Fe и Ni. Данный факт говорит о повышенных адгезионных свойствах. Более выражена структура Шарпи, т.е. мягкая матрица с твердыми включениями, что является благоприятным фактором для износостойкости. Распределение частиц различных химических элементов по покрытию – гетерогенное. Это может свидетельствовать о неоднородности исходных композиций, неравномерном налипании этих частиц по поверхности частиц в исходном порошке, это может быть обусловлено разными условиями застывания частиц.

Исследования также показали, что введение самофлюсующихся порошков, позволило уменьшить пористость покрытий. Частицы самофлюсующихся порошков в покрытиях выступают в роли уплотнителя при формировании покрытия и заполняют поры, которые возникают при использовании «чистого» порошка на основе железа. Пористость оплавленных покрытий уменьшилась и составила 1...3 % по сравнению с пористостью неоплавленных покрытий, которая составила 5...8 %. В исследуемых покрытиях поры имеют неправильную форму. Площадь пор в сечении, нормальном к границе раздела между покрытием и основой, меньше, чем в сечении, параллельном границе. Данный фактор обусловлен особенностями послойного формирования покрытий.

Исследование микротвердости покрытий. Сравнение физико-механических свойств покрытий с оплавлением показало, что наиболее твердые композиции № 1, 2 и 3. Средняя микротвердость этих покрытий составила порядка 4450 МПа, в то время как максимальная микротвердость покрытий составила порядка 7050 МПа.

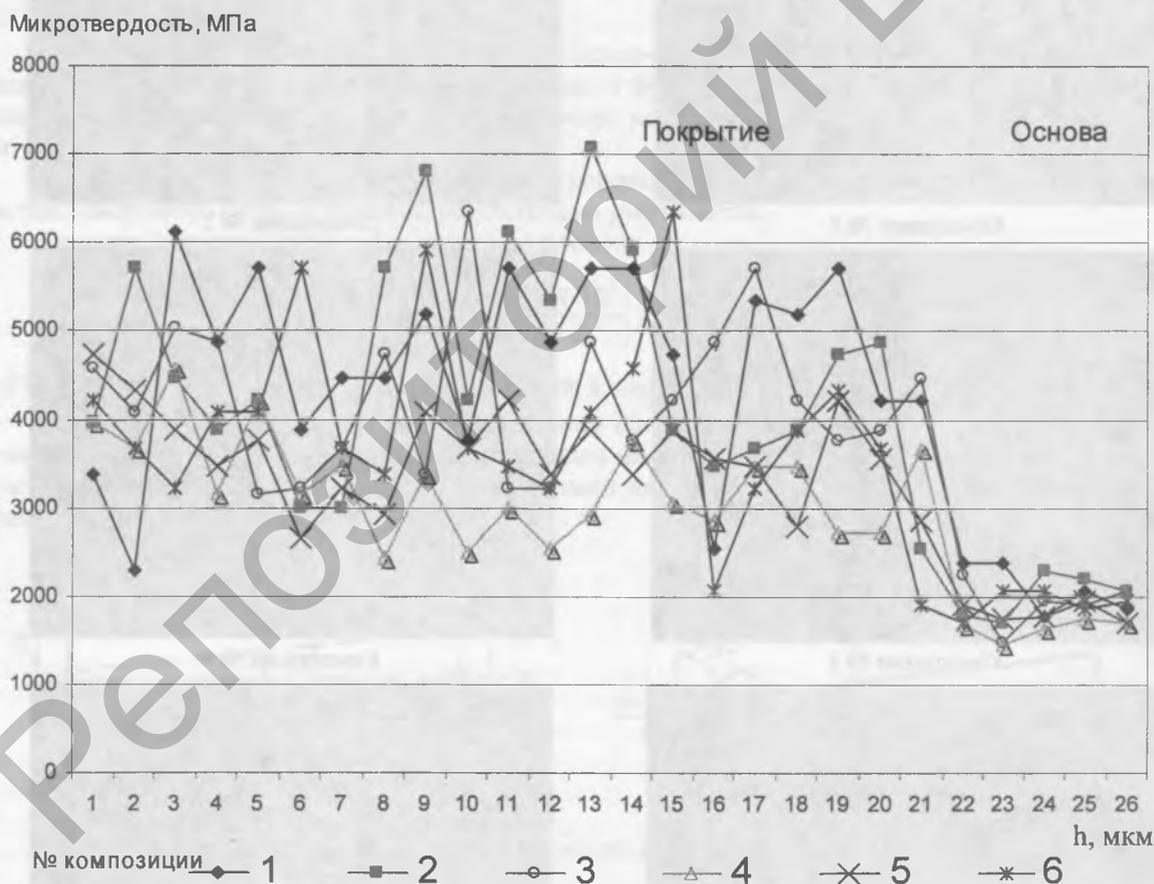


Рис. 6. Диаграмма микротвердости покрытий

Анализ структуры покрытий методом электронной микроскопии показывает, что у покрытий граница с основой менее четкая. Распределение элементов порошка по покрытию гетерогенное, что вызвано предположительно неравномерным прилипанием частиц различных композиций. Также неоплавленные покрытия из предложенных композиций порошков имеют близкую к средней пористость.

Проведенные исследования показали, что дальнейшее оплавление покрытий может снизить пористость покрытия в 2...3 раза.

Заключение. Одним из перспективных методов защиты поверхности от изнашивания и коррозионных процессов, а также повышения долговечности деталей технологического оборудования легкой промышленности является нанесение покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами газотермическими методами – газопламенным, плазменным с применением последующего модифицированием напыленных покрытий.

Решение проблемы упрочнения ответственных деталей заключается в разработке технологии получения покрытий с высоким уровнем физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик.

Проведенные исследования подтвердили, что разработанные композиции и технология формирования покрытий обеспечат высокий уровень физико-механических свойств упрочненных поверхностей за счет высокой твердости, низкой пористости, структуры типа Шарпи. Кроме того, прочность сцепления полученных покрытий с основой обеспечит их работоспособность в широком диапазоне удельных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский [и др.]. – М.: Мир, 2004. – 384 с.
2. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
3. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
4. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 295 с.
5. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
6. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко [и др.]; под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко, П.А. Витязя. – Минск: Науч. центр исследований политики и бизнеса «Армита-Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 544 с.
7. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А.Ф. Ильющенко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.
8. Основные особенности формирования многокомпонентных газотермических покрытий, обуславливающие физико-механические свойства композиций при напылении / В.И. Копылов [и др.] // Физико-химическая механика материалов. – 1991. – № 1. – С. 65 – 70.
9. Девойно, О.Г. Разработка многоцелевого программного обеспечения для исследований в области материаловедения / О.Г. Девойно, Г.Г. Панич, М.А. Кардаполова // Передовые технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей: материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24 – 25 марта 1997 г. – Минск, 1997. – С. 121 – 122.

Поступила 16.07.2012

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE LAYERS FORMED BY THERMAL SPRAYING

E. KALIN, I. SOCOROV

High-performance and economical technological processes of restoring-hardening of equipment details by combined methods of surface engineering, providing the increase of resource and improvement of working characteristics are demonstrated. The object of the study is parts of process equipment, materials for hardening-restoring parts and technology for their application. The results of the study of microhardness and the structure of deposited coatings after reflow are analyzed. Methodology of the study of physical and mechanical properties of surface layers, formed by thermal spraying methods are considered.