

УДК 621.793

М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск).  
А.Н. Белый (Белорусский национальный технический университет, г. Минск).  
Р.Р. Дема, В.И. Кадошников, С.П. Нефедьев, М.В. Харченко  
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)  
E-mail: levancev@mail.ru

## Адгезионная прочность покрытий, сформированных деформационным плакированием гибким инструментом

Приведены результаты количественной оценки адгезионной прочности покрытий, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом. Установлено, что предел прочности при нормальном отрыве образцов с покрытием из композиционных бронз, сформированным на стальной (сталь 45, 43...45 HRC) поверхности, достигает в среднем 15 МПа. При этом разрушение носит преимущественно адгезионный характер. Предел прочности аналогичных покрытий, сформированных на поверхности образцов из серого чугуна СЧ20 (45...47 HRC), составляет 11,6 МПа, при этом может иметь место как адгезионный, так и когезионный и смешанный характер разрушения. Последующая термическая обработка покрытий (отжиг в защитно-восстановительной атмосфере эндогаза при температуре 800...820 °С в течение 30...35 мин) способствует повышению их адгезионной прочности минимум в 2 раза (свыше 25 МПа) и снижению микротвердости поверхности в 1,8...2,0 раза.

**Ключевые слова:** плакирование, гибкий инструмент, покрытие, адгезионная прочность, отжиг.

*The results of quantitative assessment of adhesion strength of coatings formed by the method of deformational cladding with flexible tool. It is established that the tensile strength at normal separation of the samples with a coating of bronze composition, formed on steel surface (steel 45, 43...45 HRC), reaches an average of 15 MPa. In this case, the destruction is mainly adhesive in nature. The tensile strength of a similar coating formed on the surface of the samples from grey iron СЧ20 (45...47 HRC), is 11.6 MPa, there may occur as adhesive, cohesive and mixed failure. Subsequent heat treatment of the coatings (annealing in the protective-reducing atmosphere of endogas at a temperature of 800...820 °C for 30...35 min) contributes to the improvement of adhesion strength at least 2 times (over 25 MPa) and decrease of microhardness of surface in 1.8...2.0 times.*

**Keywords:** cladding, flexible tool, coating, adhesion strength, annealing.

### Введение

Надежность и долговечность технологического оборудования во многом зависят от состояния поверхностных слоев деталей пар трения. Для повышения надежности и долговечности оборудования, а также сокращения затрат на его обслуживание предлагается использовать новый экономичный и высокопроизводительный способ обработки поверхностей — деформационное плакирование гибким инструментом (ДПГИ) [1—4]. Плакирование гибким инструментом является универсальным способом повышения служебных свойств изделий за счет формирования на их поверхности антифрикционных, антикоррозионных, антисхватывающихся, декоративных покрытий из однородных и композиционных материалов. В отличие от напыления, наплавки, диффузионного насыщения, модифицирования, легирования при процессе плакирования гибким инструментом не

требуется дополнительной подготовительной обработки поверхности изделий. Метод ДПГИ сочетает пластическое деформирование поверхностного слоя основы с одновременным формированием покрытия. При этом материалом покрытия может быть как специальный материал-донор, так и непосредственно материал рабочих элементов гибкого инструмента. Кроме защитных функций плакирование позволяет осуществлять восстановление изношенных поверхностей, т. е. исключать затраты на изготовление новых деталей [5].

В основе способа ДПГИ лежат явления, возникающие при переносе материала покрытия с донора на обрабатываемую поверхность (рис. 1). Единичная ворсинка в процессе удара и скольжения по донору вызывает появление предельной сдвиговой деформации в поверхности, при которой материал в очаге деформации переходит в сильно возбужденное аморфизированное состояние, эквивалентное состоянию металла

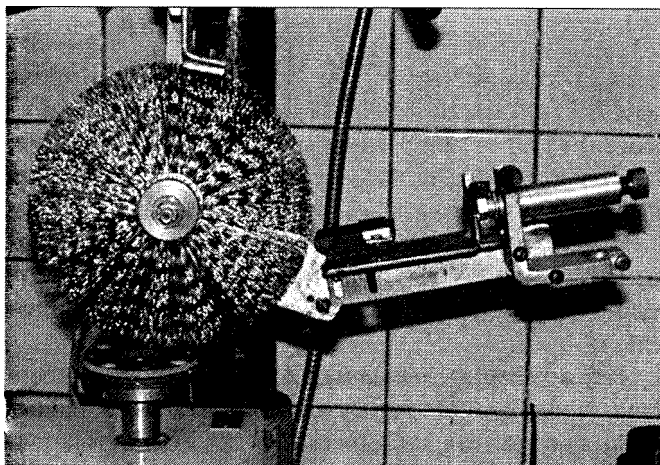
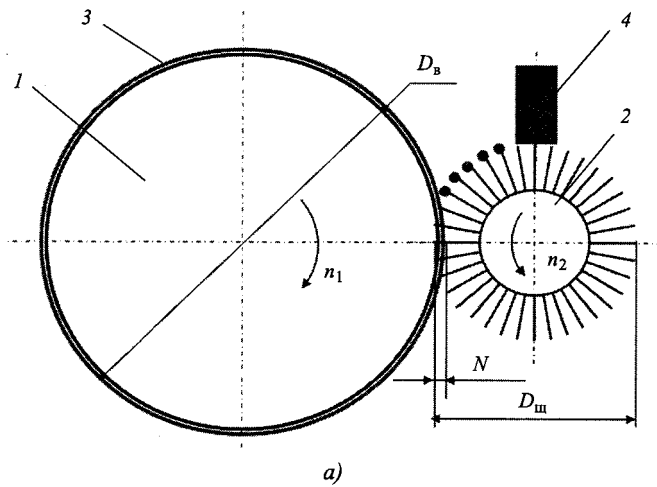


Рис. 1. Схема обработки способом ДПГИ цилиндрических (а) и плоских (б) поверхностей:

1 — образец; 2 — вращающаяся металлическая щетка; 3 — покрытие; 4 — брусок из материала покрытия

при температуре плавления [3]. В результате адгезии аморфизированного металла на торцевой ювенильной поверхности гибких элементов образуется микрообъем материала донора в виде полусферической частицы, обладающей минимальной поверхностной энергией, которая транспортируется к поверхности детали.

При ДПГИ, как и при других способах обработки металлов давлением, в зоне деформации возникают сложные картины теплового и напряженно-деформированного состояния, определяющие возможность адгезионного сцепления и направленного переноса металлов при трении, упрочнения, протекания физико-химических процессов, сопутствующих формированию поверхностного биметаллического слоя и влияющих в конечном счете на надежность и долговечность металлоизделий [2, 6].

В настоящее время исследователями достаточно хорошо изучен механизм образования покрытий методом ДПГИ, предложены различные аналитические и регрессионные модели [7–10]. Однако при оценке

прочности сцепления сформированных покрытий с основой многие исследователи оперируют лишь качественными показателями адгезионных свойств покрытий, что в определенной степени затрудняет не только выбор рациональных технологических режимов, но и расчет энергосиловых параметров процесса плакирования. Известно, что дополнительная обработка сформированного покрытия направленным тепловым источником энергии, например плазмой, способствует увеличению прочности сцепления покрытия с основой [11]. Количественная оценка адгезионной прочности покрытий, формируемых методом ДПГИ, могла бы значительно расширить технологические возможности метода и способствовать правильному выбору материала покрытия, предназначенного для эксплуатации в конкретных условиях, что, в свою очередь, позволило бы повысить надежность и долговечность технологического оборудования, особенно на этапах запуска и приработки.

**Цель работы** — экспериментальная количественная оценка адгезионной прочности покрытий, сформированных методом ДПГИ, в зависимости от материала основы, последующей термической обработки и режимов формирования покрытий.

#### Количественная оценка адгезионной прочности покрытий в зависимости от материала основы

**Методика эксперимента.** В качестве объектов исследований рассматривали композиционные покрытия на основе бронз, сформированные на плоских шлифованных поверхностях ( $Ra = 0,16$  мкм) цилиндрических образцов из стали 45 (43...45 HRC) и серого чугуна СЧ20 (45...47 HRC) (табл. 1). Формирование покрытий осуществляли вращающейся цилиндрической щеткой диаметром 150 мм, шириной 15 мм, с длиной ворса 20 мм и диаметром ворса 0,25 мм. Линейная скорость вращения щетки — 35 м/с, частота вращения образца — 60 мин<sup>-1</sup>, число проходов щетки — 6...9. Толщина сформированного покрытия на образцах из стали 45 составляла 3...5 мкм, а на образцах из серого чугуна СЧ20 — 8...10 мкм. Площадь основания, на которую наносили испытываемое покрытие, — 0,00121 м<sup>2</sup>.

Таблица 1

#### Испытываемые образцы

Номер образца	Материал основы	Материал покрытия
1	Сталь 45	Бронзографит BrO5C5Ц5Гр1ДМ0,5
2	Сталь 45	Бронза BrOЦС
3	Чугун СЧ20	Бронзографит BrO5C5Ц5Гр1ДМ0,5
4	Чугун СЧ20	Бронза BrOЦС

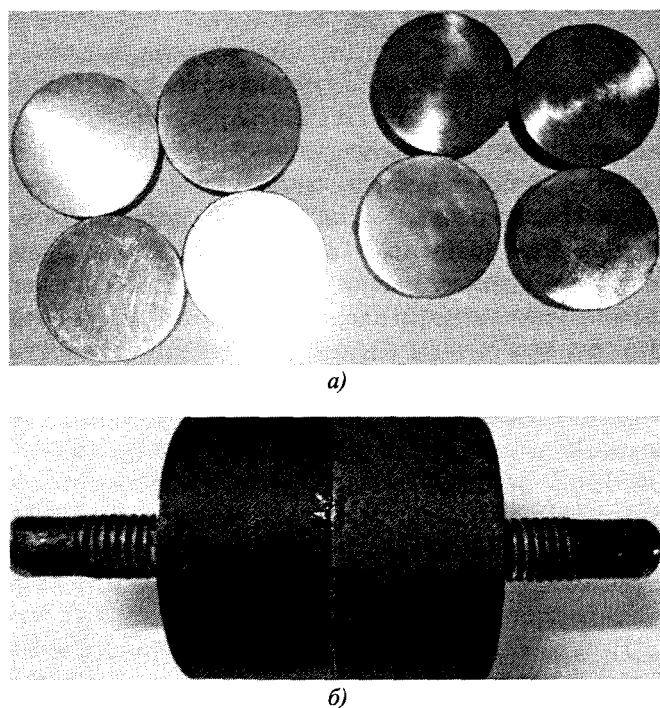


Рис. 2. Испытываемые образцы до (а) и после (б) склеивания

Образцы для испытания получали склеиванием двух плоских поверхностей цилиндрических образцов, на одну из которых было нанесено испытываемое покрытие (рис. 2).

После склеивания образцы помещали в приспособление, обеспечивающее необходимое значение давления на образцы (3000 Н), и выдерживали в нем не менее 24 ч. Для склеивания оснований использовали клей марки 3М производства Республики Корея. Ввиду отсутствия сведений об адгезионной прочности используемого клея первоначально проводили испытания непосредственно клеевого соединения (без покрытия), а затем, при удовлетворительных результатах испытания клея, оценивали адгезионную прочность соединений с покрытием.

Оценку адгезионной прочности проводили в соответствии с ГОСТ 27890—88, который устанавливает метод определения адгезионной прочности покрытий нормальным отрывом, основанный на измерении силы, необходимой для отрыва покрытий в направлении, перпендикулярном их поверхности. В качестве разрывной машины использовали универсальную гидравлическую испытательную машину Instron Satec 300LX (рис. 3).

Испытания проводили постепенным увеличением нагрузки до разрыва пары образцов. Скорость перемещения захвата разрывной машины не превышала 10 мм/мин. Фиксировали нагрузку, при которой произошло разрушение образца, после чего обе части испытываемого образца подвергали визуальному осмотру для определения характера разрушения: 1) адгезион-

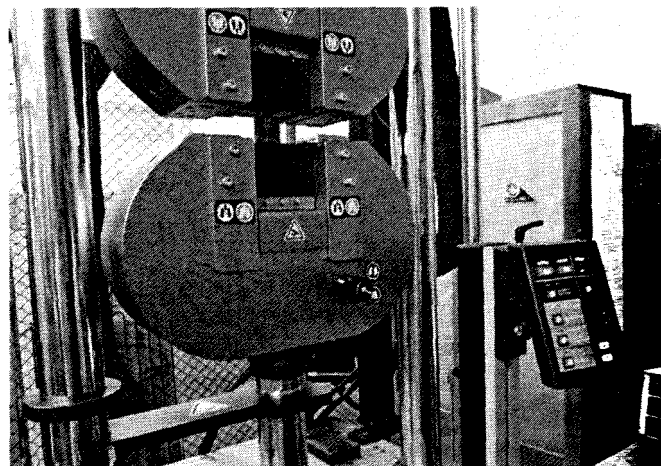


Рис. 3. Испытания образцов на разрывной машине Instron Satec 300LX

ный (А) — отрыв покрытия от основания; 2) когезионный (К) — разрушение внутри слоя покрытия; 3) межслойный (М) — разрушение между слоями покрытия; 4) смешанный (А, К, М) — сочетание перечисленных выше разрушений.

Предел прочности покрытия при отрыве образца  $\sigma_b$  в паскалях вычисляли по формуле  $\sigma_b = P/F$ , где  $P$  — сила отрыва образца, Н;  $F$  — площадь основания, м<sup>2</sup>.

**Результаты исследований.** Адгезионная прочность клея, используемого для склеивания поверхностей оснований образцов, составила 22,5...25 МПа, что вполне достаточно для проведения адгезионных испытаний многих видов покрытий. Результаты испытаний на разрывной машине образцов с разными составами покрытий приведены на рис. 4.

Как видно из представленных данных, адгезионная прочность покрытий, сформированных методом ДПГИ, может варьироваться в среднем от 5 до 15 МПа, при этом имеет место как адгезионный, так и когезионный и смешанный характер разрушения покрытий при нормальном отрыве. На адгезионную прочность и характер разрушения покрытий оказывают влияние как материал основы, так и состав материала-донора и толщина сформированного слоя. Максимальная прочность сцепления покрытий (до 15,1 МПа) наблюдается при испытаниях образцов из стали 45 с покрытием Бр05С5Ц5Гр1ДМ0,5 толщиной 3...5 мкм. При этом, как правило, имеет место адгезионный характер разрушения покрытия. Меньшую (13,2 МПа) прочность сцепления и смешанный характер разрушения имеют покрытия из бронзы БрОЦС.

На образцах из серого чугуна СЧ20 с толщиной слоя 8...10 мкм прочность сцепления покрытий из бронзы Бр05С5Ц5Гр1ДМ0,5 и БрОЦС составила 11,6 и 5,1 МПа соответственно, при этом имел место когезионный и смешанный характер разрушения покрытий.

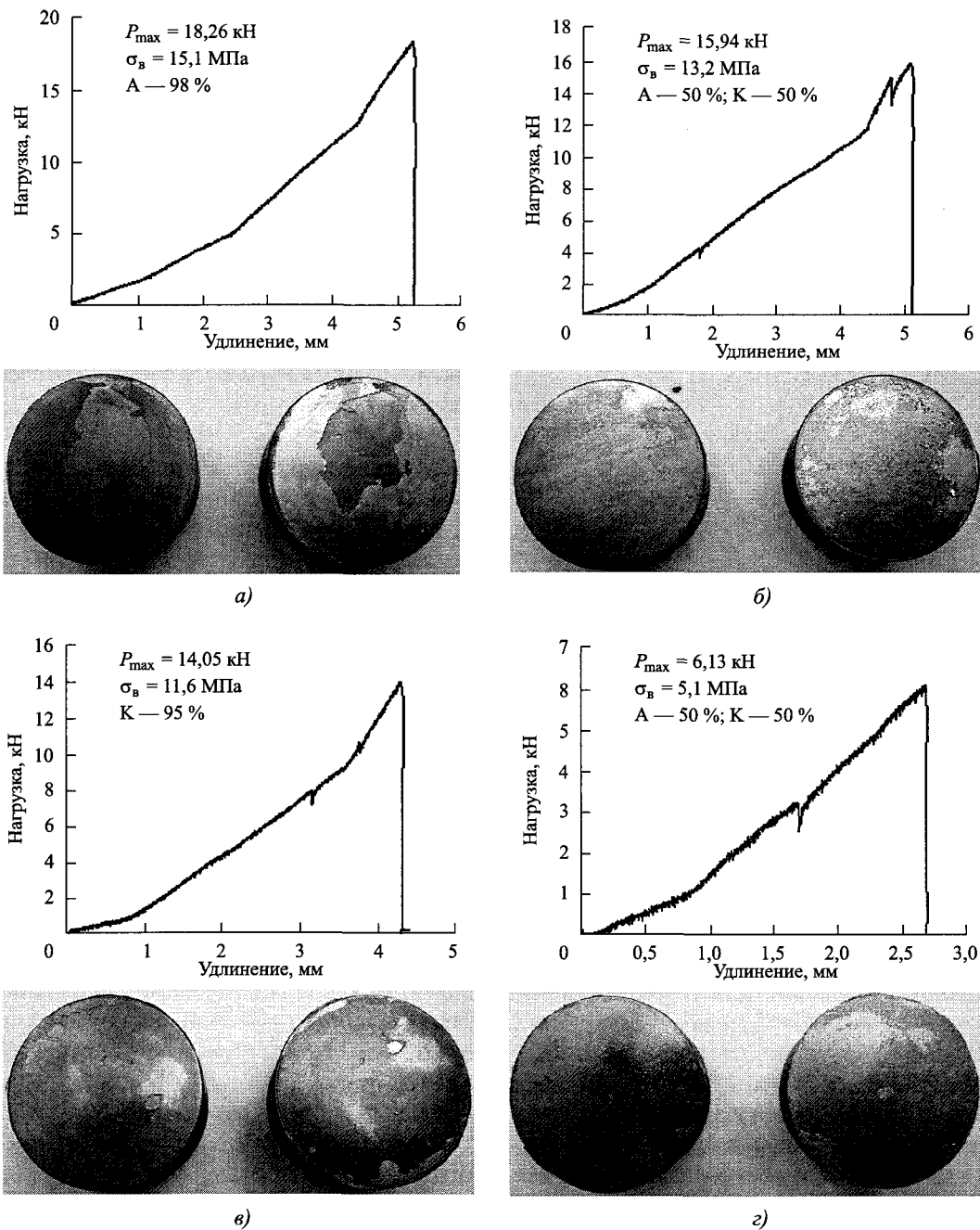


Рис. 4. Результаты испытаний на отрыв образцов с покрытием (нумерация образцов соответствует табл. 1)  
 а — образец № 1; б — образец № 2; в — образец № 3; г — образец № 4

### Изучение влияния термической обработки на адгезионную прочность покрытий

**Методика исследований** предполагала проведение испытаний на нормальный отрыв двух склеенных образцов цилиндрической формы в соответствии с ГОСТ 27890—88. Перед началом испытаний на рабочих торцовых поверхностях ( $Ra = 0,16 \text{ мкм}$ ) цилиндров, изготовленных из стали 20 (20 HRC), формировали однослойное покрытие из бронзы БрО10Ф1, а также

двухслойное покрытие двух видов: 1) из последовательно нанесенных слоев никеля и бронзы БрО10Ф1; 2) из последовательно нанесенных слоев хрома и бронзы БрО10Ф1.

Формирование покрытий осуществляли с использованием вращающейся цилиндрической щетки диаметром 150 мм, шириной 15 мм, с длиной ворса 25 мм и диаметром ворса 0,25 мм. Линейная скорость вращения щетки — 35...38 м/с, частота вращения образца — 60 мин<sup>-1</sup>, число проходов щетки — 9...12. Толщина

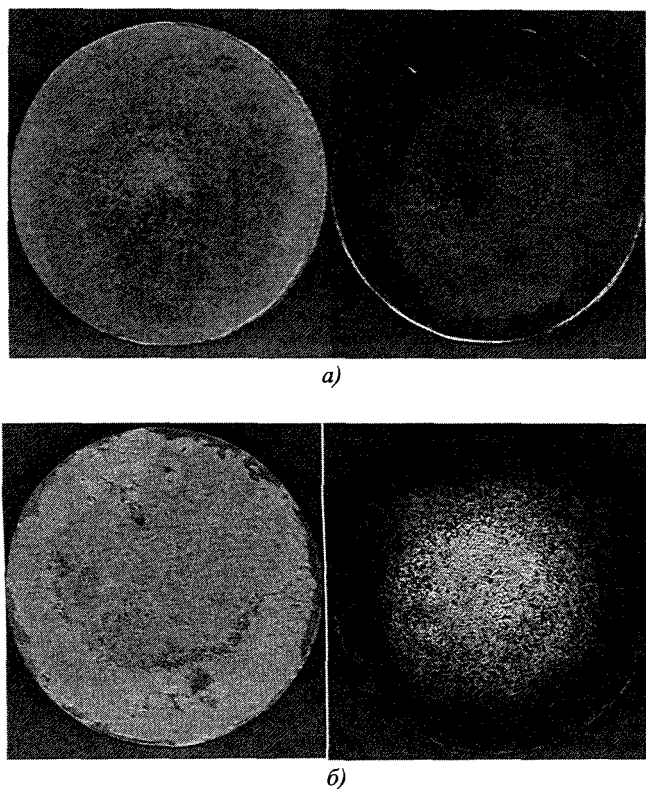


Рис. 5. Поверхности образцов с покрытием из бронзы БрО10Ф1 без отжига (а) и с последующим отжигом (б) после испытаний на разрывной машине

слоя покрытия из бронзы БрО10Ф1 на чистых поверхностях составляла 9...12 мкм, толщина покрытий из Ni и Cr — 3...4 мкм, суммарная толщина двухслойных покрытий Ni + БрО10Ф1 и Cr + БрО10Ф1 не превышала 10...12 мкм. Площадь основания цилиндрических образцов, на которую наносили покрытие, — 1193,9 мм<sup>2</sup>.

Образцы с одно- и двухслойным покрытием подвергали термообработке — отжигу в защитно-восстановительной атмосфере эндогаза при температуре 800...820 °С в течение 30...35 мин (остывание с печью).

После промывки, сушки и обезжиривания образцы с покрытием склеивали с образцами без покрытия (клей марки ЗМ производства Республики Корея, усилие сжатия 3000 Н, время выдержки склеенных образцов — 24 ч).

**Результаты испытаний.** Адгезионная прочность одно- и двухслойных покрытий, не подвергнутых отжигу, изменяется в пределах 11,5...13,5 МПа, при этом преобладает преимущественно когезионный характер разрушения покрытия (рис. 5, а).

Термическая обработка покрытий из бронзы БрО10Ф1, сформированных методом ДПГИ, оказывает существенное влияние на их адгезионную прочность: разрушение клеевого соединения происходит по клею, т. е. прочность сцепления покрытия с основой превышает адгезионную прочность используемого клея, равную 22,5...25,0 МПа (рис. 5, б).

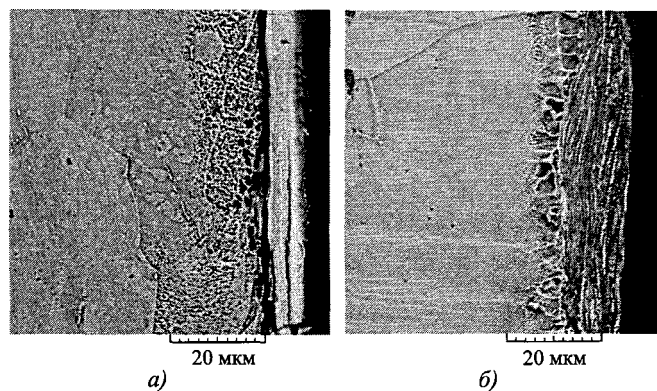


Рис. 6. Структура покрытий из бронзы БрО10Ф1 до (а) и после (б) отжига, ×3000

Металлографические исследования на сканирующем электронном микроскопе поперечных микрошлифов, изготовленных из образцов с покрытием, показали, что в результате термической обработки граница раздела между покрытием и основным металлом размывается и образуется промежуточный слой, состоящий из элементов основы и материала покрытия, что способствует увеличению прочности сцепления покрытия с основой (рис. 6). Кроме того, наряду с повышением до 2 раз адгезионной прочности покрытия в результате отжига микротвердость сформированных покрытий снижается в 1,8...2 раза: среднее значение микротвердости HV0,2 покрытий на образцах, не подвергавшихся отжигу, составило 315 кгс/мм<sup>2</sup>, а после отжига — 187 кгс/мм<sup>2</sup>.

На основании анализа имеющихся литературных данных в качестве варьируемых параметров процесса ДПГИ использовали: 1) натяг (сближение оси инструмента и обрабатываемой детали), изменяющийся в пределах 1...3 мм; 2) время обработки поверхности, изменяющееся в пределах 1...3 мин; материал покрытия — медь, алюминий, латунь, олово.

Покрытия наносили на кольцевидные пластины из нормализованной стали 45 со следующими размерами: внешний диаметр — 41 мм, внутренний диаметр — 18 мм, толщина — 10 мм. Для нанесения покрытия использовали плоскошлифовальный станок ЗГ71, на котором вместо абразивного круга устанавливали металлическую щетку с длиной ворса 80 мм и диаметром ворса 0,35 мм. Частота вращения щетки — 3000 мин<sup>-1</sup>; линейная скорость перемещения образцов — 2 м/с.

В процессе испытаний на образцах формировали покрытия из испытываемых материалов, изменяя натяг и время обработки, после чего магнитным толщиномером определяли толщину  $H$  сформированного покрытия, а гидравлическим тестером адгезии DeFelsko PosiTest AT — адгезионную прочность  $\sigma_b$ . Данные полученные при проведении опытов, представлены в табл. 2 и на диаграммах (рис. 7).

Таблица 2

Результаты эксперимента

Номер опыта	Материал покрытия							
	Медь		Алюминий		Латунь		Олово	
	$H$ , мкм	$\sigma_b$ , МПа	$H$ , мкм	$\sigma_b$ , МПа	$H$ , мкм	$\sigma_b$ , МПа	$H$ , мкм	$\sigma_b$ , МПа
1	75	6,53	150	9,56	120	6,32	170	6,4
2	100	7,17	100	4,78	150	7,43	120	7,2
3	150	8,46	120	5,99	100	6,94	140	8,4
4	87	6,1	87	4,68	170	8,8	100	7,4

Обозначения:  $H$  — толщина сформированного покрытия;  $\sigma_b$  — адгезионная прочность покрытия.

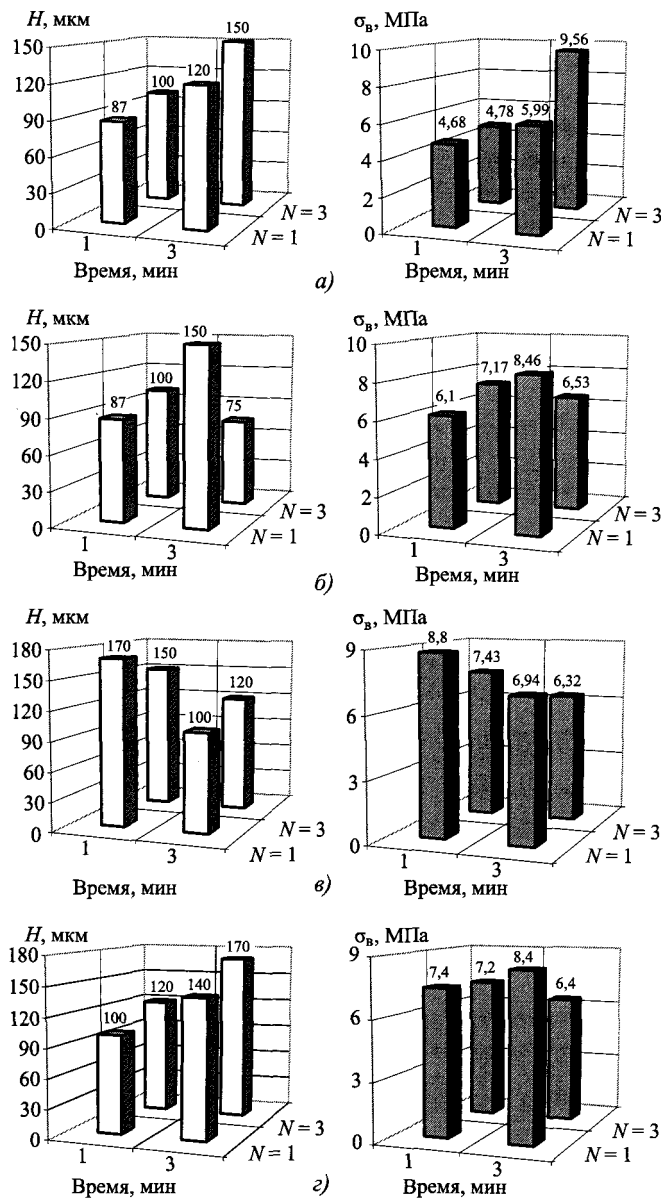


Рис. 7. Зависимость толщины  $H$  и адгезионной прочности  $\sigma_b$  покрытий от времени обработки и натяга  $N$ ; материал покрытия: а — алюминий; б — медь; в — латунь; г — олово

Анализ экспериментальных данных позволяет выделить некоторые закономерности формирования покрытий из разных материалов. Так, при использовании в качестве материала покрытия алюминия увеличение натяга и времени обработки приводит к увеличению как толщины покрытия, так и его адгезионной прочности: максимальной адгезионной прочностью 9,56 МПа обладает покрытие с максимальной толщиной, сформированное при натяге 3 мм в течение 3 мин.

Аналогичная взаимосвязь между ростом толщины покрытия и увеличением его адгезионной прочности прослеживается и для покрытий из меди (максимальной адгезионной прочностью 8,46 МПа обладает покрытие с максимальной толщиной, сформированное при натяге 1 мм в течение 3 мин). Однако влияние режимов обработки не так однозначно: если увеличение натяга при времени обработки, равном 1 мин, приводит к росту толщины и адгезионной прочности покрытия, то при дальнейшем увеличении длительности обработки увеличение натяга дает обратный эффект.

Для покрытия из латуни, как и для меди и алюминия, максимальная адгезионная прочность 8,8 МПа зафиксирована при максимальной толщине покрытия, однако увеличение натяга и времени обработки приводит как к увеличению, так и к уменьшению толщины и адгезионной прочности.

Таким образом, анализ полученных результатов свидетельствует о том, что нет универсального сочетания технологических параметров процесса плакирования, которое бы обеспечило требуемые эксплуатационные характеристики любого покрытия, — каждый материал покрытия требует разработки своих технологических режимов.

Заключение

Адгезионная прочность и характер разрушения покрытий, сформированных методом ДПГИ, в значительной степени зависят от материала основы, материала покрытия и последующей термической обработки. Максимальную адгезионную прочность (15,1 МПа) и адгезионный характер разрушения имеют покрытия из бронзы  $BrO5C5Ц5Gr1DM0,5$  толщиной 3...5 мкм, сформированные на образцах из стали 45. Меньшие значения адгезионной прочности (13,2 МПа) и смешанный характер разрушения имеют покрытия, сформированные из бронзы  $BrOC$ . Адгезионная прочность покрытий из бронз  $BrO5C5Ц5Gr1DM0,5$  и  $BrOЦC$ , сформированных на образцах из серого чугуна  $СЧ20$  с толщиной слоя 8...10 мкм, составляет 11,6 и 5,1 МПа соответственно. При этом имеет место когезионный и смешанный характер разрушения покрытий.

Последующая термическая обработка (отжиг в защитно-восстановительной атмосфере эндогаза при температуре 800...820 °С в течение 30...35 мин) подоб-

ных покрытий способствует повышению их адгезионной прочности минимум в 2 раза (свыше 25 МПа) и снижению микротвердости поверхности в 1,8...2,0 раза.

Результаты выполненных исследований имеют важное значение для дальнейших исследований, направленных на расширение технологических возможностей деформационного плакирования гибким инструментом путем формирования функционально ориентированных покрытий, а также покрытий, применяемых в качестве подслоя в процессах порошковой металлургии.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
2. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч. 1. Термопластическая деформация и процессы взаимодействия плакируемой поверхности и плакирующего слоя / Л.С. Белевский и др. // Металлург. 2006. № 10. С. 33—38.
3. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч. 2. Механизм фрикционного плакирования / Л.С. Белевский и др. // Металлург. 2006. № 11. С. 36—38.
4. Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н. Улучшение эксплуатационных характеристик деталей поверхностным модифицированием методом плакирования гибким инструментом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 10. С. 16—20.
5. Дема Р.Р. Продление ресурса сменного оборудования

метизных агрегатов на основе моделирования процесса изнашивания и применения плакирования рабочих поверхностей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2005.

6. Смирнов О.М., Тулупов С.А. Термокинетический анализ процесса фрикционного плакирования // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2009. № 9. С. 38—43.

7. Леванцевич М.А. Модель контактного взаимодействия вращающейся металлической щетки с поверхностью при деформационном плакировании // Механика материалов и механизмов, материалов. 2014. № 2. С. 74—80.

8. Расширение технологических возможностей плакирования гибким инструментом // В.И. Кадошников и др. // Вестник машиностроения. 2003. № 10. С. 64—66.

9. Платов С.И., Дема Р.Р., Зотов А.В. Модель формирования толщины плакированного слоя на деталях пар трения технологического оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1 (41). С. 69—72.

10. Максимченко Н.Н. Исследование фрикционного плакирования гибким инструментом с использованием некомпозиционных планов второго порядка // Вестник машиностроения. 2013. № 9. С. 38—42.

11. Microstructure of cast iron after plasma bleaching S.P. Nefedyev, R.R. Dema, S.A. Nefedyeva, A.V. Yaroslavtcev Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2015. Vol. 50 No. 2. С. 213—216.