

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

---

МРНТИ 55.22.29

С.Нураков<sup>1</sup>, М.А.Белоцерковский<sup>2</sup>, Е.Ф.Коновалова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева,  
г. Астана, Казахстан

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

---

**Аннотация.** Приведены результаты исследования возможности использования методов обработки гибким инструментом, включающие иглофрезерование и деформационное плакирование, для обеспечения необходимой прочности сцепления газотермических покрытий различного функционального назначения. Определены оптимальные режимы процесса иглофрезерования, обеспечивающие максимальную шероховатость. Показано, что процесс иглофрезерования можно рекомендовать только для подготовки поверхности перед нанесением коррозионностойких полимерных покрытий. Апробировано применение процесса деформационного плакирования в газотермических технологиях для подготовки поверхности и нанесения промежуточного слоя для металлических покрытий. При этом обеспечивается прочность сцепления с подложкой, сравнимая с традиционным методом нанесения подслоев из нихрома.

**Ключевые слова:** металлические щетки, иглофрезерование, газотермическое напыление, газотермические покрытия.



**Түйіндеме.** Икемді құрал арқылы бөлшектердің бетін бүрку алдында жаңадан әсерлі әдістерді табу мақсатында екі әдіс зерттелді. Әртүрлі функционалды бағыттардың қажетті газотермиялық беткі бөліктерінің қажетті беріктілігін қамтамасыз ету үшін иглофрезиялау және деформационды плакирлеуді қоса алатын, икемді құралмен әдістерді қолдануының

мүмкіндіктердің зерттеуінің нәтижелері көрсетілді. Иглофрезиялау процесінің максималды кедірлігін қамтамасыз ететін оптималды режимдері анықталды. Сонымен қатар бұл процесті коррозияға қарсы тұра алатын полимерлі беттерді дайындау алдында қолдануға болатыны көрсетіледі. Металды беттер үшін аралық қабатты орналастыру және беткі қабатын дайындау үшін газотермиялық технологиялардағы деформационды плакирлеу процесінің қолданылуы сынақталды. Сол кезекте нихромнан жасалған аралық қабаттарды бүрку дәстүрлі әдісімен теңестірілетін артқы қысудың мықтылығы қамтамасыз етіледі.

**Түйінді сөздер:** металды щетка, иглофрезиялау, газотермиялық бүркілеу.



**Abstract.** With a view to selecting new effective methods of surface preparation of parts two methods for processing flexible tool investigated before spraying. The results of the study the possibility of using a flexible instrument processing methods, including wire brushing deformation and cladding, to provide the necessary adhesion of thermal coatings for various applications. Optimum modes of wire brushing process to ensure maximum surface roughness. It is shown that wire brushing process can be recommended only for surface preparation prior to application of corrosion-resistant coatings. Tested for use in the process of deformation clad thermal spray technologies for surface preparation and application of the intermediate layer for metal coverings. This ensures the adhesion strength with the substrate, with a comparable conventional method of applying sublayers nichrome.

**Key words:** metal brushes, wire brushing roughness, gas-thermal spraying.

**Введение.** Основным фактором, определяющим работоспособность газотермических покрытий, является адгезия материала покрытия к подложке и ее стойкость к внешним факторам, действующим в процессе эксплуатации. Значение адгезионной прочности покрытия к подложке во многом зависит от предварительных операций подготовки поверхности, на которую оно наносится.

Существуют различные методы подготовки, но чаще всего используют механическую обработку (зачистку металлическими щетками и струйно-абразивную обработку). Применение механической обработки позволяет обеспечить чистоту и шероховатость поверхности изделия перед нанесением покрытия.

Создание высокопроизводительных технологий газотермического напыления покрытий обуславливает необходимость раз-

работки новых методов подготовки поверхности деталей, позволяющих не только упростить, но и осуществлять процесс в автоматическом режиме. Все большее распространение в технологии обработки металлов получают процессы резания и шлифования гибким инструментом: иглофрезами и металлическими щетками [1]. Возможность получения на подготовленной поверхности шероховатости с параметрами, изменяемыми в широких пределах, позволяет предположить, что крацевание и иглофрезерование могут быть одними из наиболее высокопроизводительных методов подготовки деталей перед напылением покрытий.

Для обеспечения высокой адгезионной связи основного покрытия с подложкой помимо подготовки поверхности в практике газотермического напыления покрытий различного функционального назначения широко используется такой технологический прием, как нанесение промежуточного слоя. Формирование промежуточного слоя (или «подслоя») после обязательной струйно-абразивной подготовки осуществляется напылением термореагирующих порошков, например алюминидов никеля, или распылением проволок из металлов и сплавов с температурой плавления выше, чем температура плавления материала подложки. В этих случаях частицы металла, формирующие промежуточный слой, расплавляют микрообъемы поверхности в месте падения на деталь и образуют очаги микросварки [2].

К недостаткам этой технологии следует отнести необходимость формирования промежуточного слоя толщиной не менее 100 мкм, поскольку слои меньшей толщины не образуют сплошного покрытия, а также сложность реализации способа при упрочнении – восстановлении крупногабаритных и длинномерных деталей, так как струйно-абразивная подготовка в данном случае затруднительна или невозможна.

Одним из наиболее простых в реализации и эффективных методов нанесения относительно тонких слоев является метод деформационного плакирования вращающимися щетками [3]. Метод заключается в переносе при помощи щетки с металлическим ворсом частиц материала-донора на поверхность обрабатываемой детали с образованием слоя толщиной 15-30 мкм.

При реализации процесса донор прижимается к быстровращающейся проволочной щетке, далее к щетке подводится лакируемая деталь и между ними создается натяг за счет вдавливания ворса на глубину, зависящую от конструктивных параметров щетки и режимов обработки. Ударно-скользящее воздействие ворса на деталь приводит к совместной пластической деформации материалов основы и донора, что способствует их прочному соединению. Технология позволяет осуществлять за одну операцию очистку поверхности от загрязнений, старой краски и пластовой ржавчины с последующим формированием слоев из металлов и сплавов, спеченных компози- тов, полимеров.

**Цель исследований** – оценка возможности использования методов обработки гибким инструментом (металлическими щетками) для обеспечения необходимой прочности сцепления газотермических покрытий различного функционального назначения.

**Оборудование, материалы и методики исследований.** Обработку плоских поверхностей образцов иглофрезерованием выполняли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Использовали иглофрезу диаметром  $D = 120$  мм, шириной  $B = 20$  мм и плотностью набивки проволочных элементов 75-85 %. Диаметр единичного проволочного элемента  $d = 0,3$  мм, вылет  $L = 20$  мм. Обрабатываемый материал – конструкционные стали: сталь 45, 12ХНЗА, чугуны СЧ15, СЧ25, ВЧ50 и латунь ЛС64-2.

Для оценки шероховатости поверхности после иглофрезерования применялся действующий в настоящее время комплект международных норм, характеризующих геометрическую структуру обработанной поверхности – ISO 3274:1997 и ISO 4287:1998. Определяемый параметр  $Ra$  – средняя арифметическая высота профиля (arithemical mean deviation of the assessed profile) – средняя арифметическая абсолютных значений высот профиля внутри элементарного отрезка  $lr$  (рис. 1):

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i|; \quad (1)$$

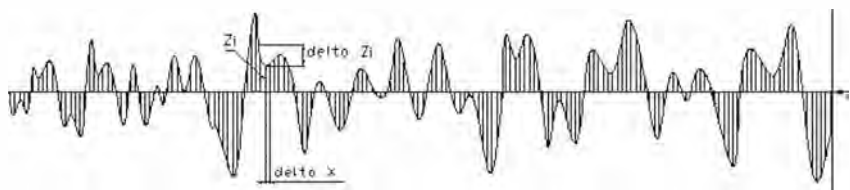


Рис. 1. Схема к расчету Ra

Измерение характеристик шероховатости поверхностей образцов после иглофрезерования выполняли на профилометре М2. При исследовании топографии поверхности был использован комплекс для микро- и макроанализа поверхности на базе микроскопа МКИ-2М-1 с увеличением до 1200 крат и преобразователя изображения с помощью цифровой камеры «Никон» с разрешением 4,5 млн. пикселей и последующей передачей изображения на ПЭВМ.

Для газотермического нанесения покрытий использовали установки активированного газопламенного напыления проволок (ТЕРКО), активированного газопламенного напыления полимерных порошков (ТЕРКО-П) и гиперзвуковой металлизации (АДМ-10) [4, 5]. Наносимые материалы: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиэтилентерефталат, стали 12Х18Н10Т, 95Х18 и 40Х13, бронза БрКМц 3-1, сплав Х20Н80. Деформационным плакированием наносились самофлюсующиеся сплавы на никелевой основе, произведенные на ОАО «Полема» (РФ), Торезском заводе наплавочных твердых сплавов (Украина), фирмой «Castolin Eutectic» (Швейцария). Слои наносились на экспериментальной установке конструкции ОИМ НАН Беларуси вращающимися стальными щетками диаметром 180-200 мм, шириной 20 мм, с толщиной и вылетом ворса – соответственно 0,25 и 30 мм. Покрытия наносили на поверхность образцов из стальных пластин 50×50×4 мм, а также на торец конусных штифтов, используемых в приспособлении для оценки прочности сцепления «на отрыв» нормально приложенной нагрузкой.

**Результаты.** Для определения влияния параметров режима иглофрезерования на изменение характеристик топографии поверхности использовали математическое планирование эксперимента [6]. При планировании исследований применяли метод ЛПТ-последовательностей. В этом случае точки реализации экспериментов располагаются в многомерном пространстве таким образом, чтобы их проекции на оси  $X_1$ - $X_2$ ,  $X_2$ - $X_3$ , ...,  $X_i$ - $X_j$  располагались на равном расстоянии друг от друга. Координаты точек рассчитывались из условия  $X_{min} = 0$  и  $X_{max} = 1$ . Пример проекции 7 точек на оси  $X_1$  и  $X_2$  изображен на рис. 2. Значения параметров режима иглофрезерования, принятые за основной уровень в данном эксперименте: скорость резания  $v = 330$  м/мин., подача  $S = 660$  мм/мин., натяг  $i = 0,44$  мм. Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 1, а условия проведения опытов приведены в табл. 2.

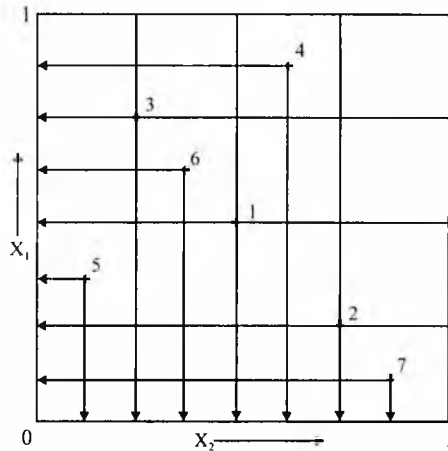


Рис. 2. Проекция 7 точек на оси  $X_1$  и  $X_2$

Таблица 1

**Матрица планирования эксперимента**

Фактор	Точка исследования						
	1	2	3	4	5	6	7
$X_1$	0,500	0,250	0,750	0,875	0,375	0,625	0,125
$X_2$	0,500	0,750	0,250	0,625	0,125	0,375	0,875
$X_3$	0,500	0,250	0,750	0,125	0,625	0,375	0,875

Таблица 2

**Условия проведения опытов**

Номер опыта	$X_1$ – скорость резания $v$ , м/мин.	$X_2$ – подача $S$ , мм/мин.	$X_3$ – натяг $i$ , мм
1	165	330	0,22
2	82	495	0,11
3	248	165	0,34
4	290	412	0,06
5	124	82	0,28
6	206	248	0,17
7	41	578	0,39

При решении технологических задач для моделирования исследуемого процесса широко используются уравнения множественной регрессии:

$$y = C \prod x_i^{m_i} \text{ и } y = \exp(b_0 + S b_i x_i). \quad (2)$$

Их можно привести к линейному виду путем логарифмирования с последующим использованием метода наименьших квадратов. В случае применения ПЭВМ можно воспользоваться методикой Д.Полларда [7]:

$$x = \begin{pmatrix} 1 \dots x_1 \\ \dots \\ 1 \dots x_i \\ \dots \\ 1 \dots x_n \end{pmatrix}; y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}; Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_i \\ \dots \\ Y_n \end{pmatrix}; b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_i \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Тогда

$$Xb = \begin{pmatrix} b_0 + b_i x_1 \\ \dots \\ b_0 + b_i x_i \\ \dots \\ b_0 + b_i x_n \end{pmatrix}; y - Xb = \begin{pmatrix} y_1 - b_0 - b_i x_1 \\ \dots \\ y_i - b_0 - b_i x_i \\ \dots \\ y_n - b_0 - b_i x_n \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Критерий минимизации записывается, как

$$(y - Xb)^T(y - Xb) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Расчетные значения  $Y$  рассматриваемой функции равны

$$Y = Xb. \quad (6)$$

Рассматривая матрицу  $S = X^T X$  и вектор  $X^T y$ , можно заметить, что  $S$  имеет порядок  $2 \times 2$ , а размерность вектор-столбца  $X^T y$  равна 2.

Таким образом

$$S = \begin{pmatrix} n \dots \sum_{i=1}^n x_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n x_i \dots \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{pmatrix}; X^T y = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{pmatrix} \quad (7)$$



Тогда уравнения метода наименьших квадратов в матричном виде могут быть записаны, как

$$b = S^{-1}X^T y. \quad (8)$$

На основе полученных результатов были разработаны математические модели (9), (10) влияния параметров режима обработки на изменение исследуемой характеристики геометрической структуры поверхности:

Сталь 12ХН3А

$$Ra = 8,52v^{-0,300} s^{0,126} i^{0,106}, \quad (9)$$

Сталь 45

$$Ra = 19,2v^{-0,166} s^{-0,51} i^{-0,137} \quad (10)$$

Одномерные сечения функций отклика представлены на рис. 3.

Аналогичным образом были разработаны математические модели (11)-(14) влияния параметров режима обработки на изменение шероховатости поверхности  $Ra$ . Для чугунов:

СЧ15

$$Ra = 2,06V^{0,011} s^{0,141} i^{0,285}, \quad (11)$$

СЧ25

$$Ra = 2,53V^{-0,006} s^{0,015} i^{0,084}, \quad (12)$$

ВЧ50

$$Ra = 3,42v^{0,080} s^{-0,114} i^{0,055}, \quad (13)$$

Для латуни ЛС64-2

$$Ra = 34,8v^{-0,240} s^{-0,276} i^{-0,188}; \quad (14)$$

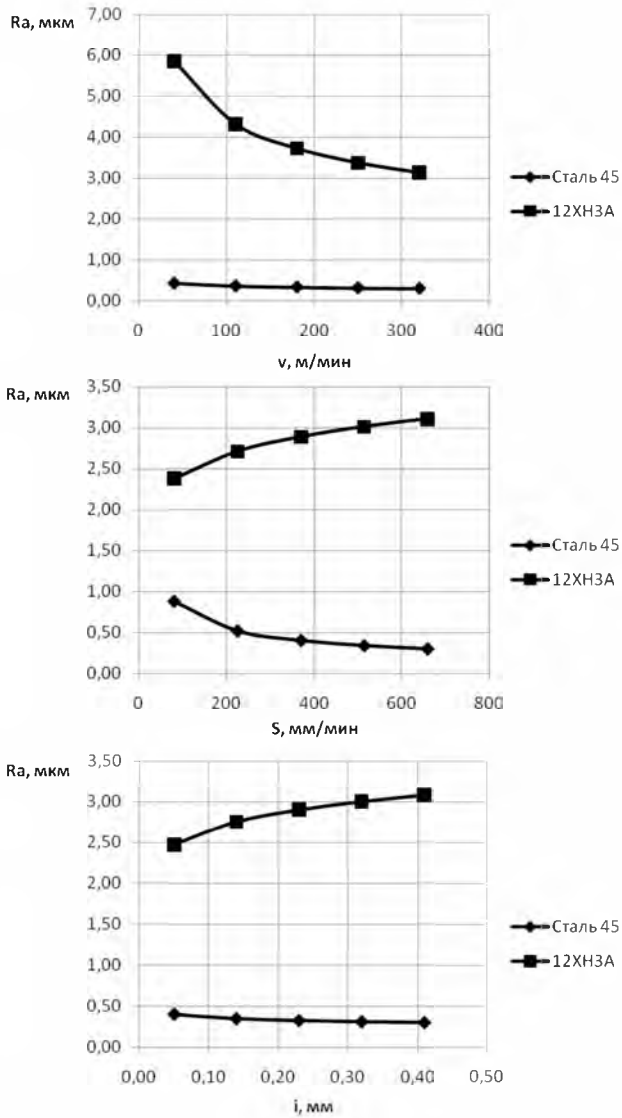


Рис. 3. Влияние скорости резания  $v$ , подачи  $S$ , натяга  $i$  на изменение шероховатости поверхности  $Ra$  для сталей

Анализ полученных результатов показал, что повышение скорости  $v$  иглофрезерования способствует снижению значения шероховатости для стали 12ХН3А, но на величину шероховатости стали 45 и чугуна (СЧ15, СЧ20, ВЧ50) значительного влияния не оказывает. Повышение продольной подачи  $S$  ведет к увеличению исследуемых характеристик шероховатости – для чугуна СЧ15, к уменьшению исследуемых характеристик шероховатости – для чугуна ВЧ50. Для чугуна СЧ20 и сталей изменение значения подачи  $S$  на величину параметра шероховатости влияния практически не оказывает.

Увеличение натяга  $i$  в системе «обрабатываемая поверхность – рабочая поверхность иглофрезы» способствовало росту исследуемой характеристики шероховатости для стали 12ХН3А и чугуна СЧ15. Для стали 45, чугуна СЧ20 и ВЧ50 изменения значений  $Ra$  незначительны. Для латуни увеличение всех параметров процесса иглофрезерования (скорости резания  $v$ , подачи  $S$ , натяга  $i$ ) способствует уменьшению параметра шероховатости  $Ra$ . При равных натягах иглофреза с большей длиной игл обеспечивает получение меньшей шероховатости поверхности, что можно объяснить увеличением доли микровыглаживания в общем процессе резания и уменьшением толщины удаляемого слоя в результате роста величины отжатий игл.

Максимальная величина параметра шероховатости  $Ra$ , достигаемая в процессе иглофрезерования, составляет для сталей около 6 мкм, для чугунов – около 3,6 мкм, для латуней – 4,8 мкм.

Результаты измерений прочности сцепления покрытий из полимеров и металлов, сформированных на различных поверхностях, представлены в табл. 3 и 4. Для сравнения приведены результаты исследования адгезии покрытий, нанесенных на шлифованные и обезжиренные образцы.

Анализ полученных результатов показал, что иглофрезерование металлических поверхностей по сравнению с обезжириванием обеспечивает повышение адгезии металлических и полимерных покрытий на 55-70 %, однако абсолютные величины прочности сцепления металлических покрытий на отрыв не достаточ-

но высоки. Так, при нанесении покрытий газопламенным распылением проволок или электродуговой металлизацией используется струйно-абразивная подготовка, которая обеспечивает адгезию 25-40 МПа [8]. Это обусловлено тем, что показатель  $Ra$  при струйно-абразивной обработке составляет 20-25 мкм.

Относительно высокие значения адгезии у покрытий, полученных распылением нержавеющей стали 12Х18Н10Т, можно объяснить большей температурой плавления этого материала, чем материала подложек. Расплавленные частицы, не успевая

Таблица 3

**Результаты исследования адгезии полимерных покрытий, полученных газопламенным напылением**

Наносимый материал	Метод подготовки поверхности	Прочность сцепления с различными материалами, МПа		
		сталь	чугун	латунь
Сверхвысокомолекулярный полиэтилен	Обезжиривание	4,1	4,0	4,0
	Иглофрезерование	7,6	6,9	7,2
Полиэтилентерефталат	Обезжиривание	3,9	3,7	3,9
	Иглофрезерование	7,0	6,6	6,8

Таблица 4

**Результаты исследования адгезии металлических покрытий, полученных гиперзвуковой металлизацией**

Наносимый материал	Метод подготовки поверхности	Прочность сцепления с различными материалами, МПа		
		сталь	чугун	латунь
Сталь 12Х18Н10Т	Обезжиривание	8,9	8,9	9,0
	Иглофрезерование	15,4	15,3	15,6
Бронза БрКМц	Обезжиривание	8,7	8,6	8,8
	Иглофрезерование	11,2	11,1	12,4

остыть, подплавляют микроучастки поверхности подложки с возникновением очагов микроприварки.

Полученные значения прочности сцепления полимерных материалов с металлами могут удовлетворять требованиям, предъявляемым к защитным коррозионностойким полимерным покрытиям, однако для деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся в условиях сухого трения, необходимо обеспечить величину адгезии более 8,5 МПа [9].

На следующем этапе исследований при помощи щетки с металлическим ворсом осуществляли предварительную подготовку (очистку) поверхности, а затем срезание и перенос частиц материала самофлюсующегося сплава с элемента-донора на поверхность детали и формировали слой толщиной 15-30 мкм. В данном случае щеткой осуществляется срезание и перенос частиц материала наружного слоя с элемента, состоящего из такого же материала-донора, на обрабатываемую поверхность и формируют слой на изделии. Такой метод плакирования основан на контакте щетки одновременно с материалом-донором и покрываемой поверхностью. При этом могут быть нанесены слои из полимеров, металлополимеров, металлов и сплавов, спеченных композитов. Прочность сцепления плакированных слоев с основным металлом составляет более 35 МПа.

Использование для нанесения промежуточных слоев метода деформационного плакирования обусловлено прежде всего тем, что обеспечивается их высокая адгезия и 100 %-ная сплошность при толщине 15-20 мкм. Для его реализации не требуется стационарного оборудования (такого, как например, источники питания, газы или ванны электрохимического осаждения). Процесс не зависит от размера и конфигурации детали или конструкции, он достаточно производителен и полностью экологически безопасен.

Выбор в качестве материала промежуточного слоя самофлюсующегося сплава на основе никеля твердостью не выше 22 HRC обусловлен следующими факторами:

- низкой температурой плавления (880-1060 °C);
- высокой пластичностью;
- способностью образовывать твердые растворы и химические соединения со сталями.

Расплавленные частицы стальной проволоки, попадая на тонкий слой самофлюсующегося сплава на основе никеля, подплавляют его и образуют очаги микросварки, что способствует повышению прочности сцепления формируемого стального покрытия с основой.

В ходе исследований по отработке режимных параметров процесса формирования деформационным плакированием металлических слоев было установлено, что технологические параметры процесса деформационного плакирования (скорость скольжения щетки по поверхности обрабатываемой детали, число оборотов детали, величина натяга) и конструктивные параметры щетки (диаметр щетки, длина и плотность набивки ворса) определяются в основном твердостью наносимого материала. Анализ результатов экспериментов показал (табл. 5), что для наиболее эффективного выполнения процесса деформационного плакирования при нанесении слоев из самофлюсующихся сплавов необходимо использовать доноры твердостью не более 22 HRC.

Для сравнения при исследовании прочности сцепления стальных покрытий испытывались образцы с промежуточным слоем, нанесенным на поверхность после струйно-абразивной обработки распылением проволоки из нихрома (сплав марки Х20Н80). Результаты:

- покрытия с промежуточным слоем, полученным деформационным плакированием, имели прочность сцепления 37-45 МПа;
- покрытия с промежуточным слоем, полученным напылением нихрома, имели прочность сцепления 44-51 МПа.

Экспериментальная проверка способа осуществлялась при восстановлении штоков с поврежденной хромированной наружной поверхностью, контактирующей с уплотнительными элементами. Длина рабочей поверхности – 900 мм, диаметр штока – 146 мм.

Процесс деформационного плакирования осуществлялся на экспериментальной установке на следующих режимах:

- число оборотов детали – 170 об/мин.;
- скорость скольжения ворса щетки относительно детали – 35-40 м/с;

- частота вращения щетки 3000 об/мин.;
- величина натяга (относительное сближение оси щетки с поверхностью детали) – 2 мм.

После очистки поверхности, произведенной за 3 прохода щеткой, материал-донор, изготовленный из самофлюсующегося сплава на основе никеля марки ПР-НС2Р (твердость сплава 90-92 HRB) в виде таблетки, прижимали к стальному ворсу с усилием 40 Н и выполняли 6 проходов по поверхности детали. Были

Таблица 5

**Зависимость толщины формируемого покрытия от твердости самофлюсующегося сплава на основе никеля**

Марка материала-донора изготовитель	Температура плавления материала-донора, °С	Твердость донора	Толщина формируемого покрытия за 5 проходов, мкм	Сплошность, %
ПГ-10Н-04 / ТЗНТС	960	89-96 HRB (< 20 HRC)	23-25	100
ПР-НС2Р / ОАО «Полема»	1065	90-92 HRB (< 20 HRC)	20-23	100
ПР-НД42СР / ОАО «Полема»	1060	190-230 НВ (< 20 HRC)	18-20	100
ПР-НС2РП / ОАО «Полема»	880	17-21 HRC	17-19	100
ПР-НС2Р2 / ОАО «Полема»	1050	18-22 HRC	17-19	98-100
РЕ 8418 / «Castolin Eutectic»	860	18-22 HRC	17-19	98-100
ПР-НХ13СР / ОАО «Полема»	1030	26-34 HRC	14-15	80-90
ПР-НХ4С3Р / ОАО «Полема»	1050	30-35 HRC	10-12	50-60
ПР-НХ13СР3 / ОАО «Полема»	1020	48-50 HRC	8-10	Менее 40
ПГ-10Н-01 / ТЗНТС	1030	51-55 HRC	5-8	Менее 30

нанесены слои толщиной около 25 мкм, после чего на них методом гиперзвуковой металлизации формировали покрытия из стали 95X18.

Испытания осуществляли на стенде для ускоренных испытаний штоков, имитирующем работу штока при радиальных нагрузках, превышающих номинальные в 2,5 раза. Результаты испытаний показали высокую работоспособность полученных по разработанной технологии покрытий.

Математическая обработка результатов, представленных в табл. 5, при использовании встроенной функции «линия тренда» программы Microsoft Office Excel, позволила получить эмпирическую формулу (1), определяющую зависимость толщины формируемого покрытия  $h_T$  (мкм) от твердости (HRC) самофлюсующегося сплава. График зависимости представлен на рис. 4.

$$y = 252,59x^{-0,857}, \quad (15)$$

где  $y$  – толщина формируемого покрытия  $h_T$ , мкм;  
 $x$  – твердость самофлюсующегося сплава, HRC.

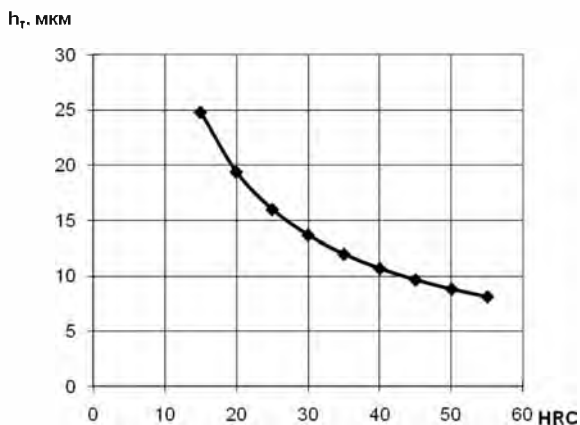


Рис. 4. Зависимость толщины формируемого покрытия  $h_T$  за 5 проходов от твердости донора



**Выводы.** В результате выполненных исследований установлено влияние режимов иглофрезерования на величину шероховатости поверхностей сталей, чугунов и латуни ЛС64-2. Показано, что максимальная величина параметра шероховатости  $R_a$ , достигаемая в процессе иглофрезерования, составляет для сталей около 6 мкм, для чугунов – около 3,6 мкм, для латуней – 4,8 мкм. Выполнена оценка прочности сцепления газотермических покрытий из полимерных и металлических материалов с металлической подложкой, обработанной иглофрезерованием. Установлено, что процесс иглофрезерования можно рекомендовать как технологическую операцию подготовки поверхности при нанесении коррозионностойких защитных полимерных покрытий. Для подготовки поверхности перед нанесением металлических покрытий иглофрезерование не рекомендуется.

Анализ результатов проведенных исследований показал возможность использования процесса деформационного плакирования в газотермических технологиях для подготовки поверхности и нанесения промежуточного слоя. При этом обеспечивается прочность сцепления с подложкой, сравнимая с традиционным методом нанесения подслоев из нихрома. Установлено, что в случае использования метода деформационного плакирования для подготовки поверхности под напыление и нанесения промежуточного слоя необходимо в качестве донора выбирать материал, способный образовывать твердые растворы и химические соединения с материалом напыляемого покрытия. Показано, что при нанесении промежуточных слоев из самофлюсующихся сплавов необходимо использовать доноры твердостью не более 22 HRC.

### Список литературы

1 Баршай И.Л., Шелег В.К., Фельдштейн Е.Э. Формирование качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при иглофрезеровании и комбинированной обработке иглофрезированием и поверхностным пластическим деформированием. – Минск: БНТУ, 2009. – 231 с.

2 Солоненко О.П., Перфильев А.В., Смирнов А.В. Растекание и затвердевание капель металлических расплавов в условиях подплавления подложки. Теория и модельный эксперимент // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, вып. 20. – С. 63-69.

3 Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Зольников В.Г. Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – № 1. – С. 67-72.

4 Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. – Минск: Технопринт, 2004. – 200 с.

5 Черепко А.Е., Белоцерковский М.А., Прядко А.С. Технологии гиперзвуковой металлизации // Механика – 2011: сб. науч. докл. V Белорус. конгресса по теорет. и приклад. мех., 26-28 окт. 2011 г.: в 2 т. – Минск. – 2011. – Т. 2. – С. 138-143.

6 Яцерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. – Минск: Высшая школа, 1985. – 286 с.

7 Поллард Д. Справочник по вычислительным методам статистики / пер. с англ. В.С.Занадворова. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

8 Khameneh Sh., Heydarzadeh M. Effect of grit-blasting parameters on the surface roughness and adhesion strength of sprayed coating† // Surface and Interface Analysis. – 2010. – Vol. 42, № 6-7. – P. 551-554.

9 Голопятин А.В. Влияние морфологии поверхности элементов трибосистемы на адгезию напыленных полимерных композиций: матер. Междунар. науч.-техн. конф. // Механика машин. Теория и практика. – Минск: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2003. – С. 382-389.