

УДК 621.793

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

В.К. ШЕЛЕГ, д-р техн. наук; Е.Ф. КОНОВАЛОВА
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Приведены результаты исследования шероховатости металлических поверхностей, обработанных иглофрезерованием, а также адгезии газотермических покрытий, нанесенных на обработанные поверхности. Определены оптимальные режимы процесса, обеспечивающие максимальную шероховатость. Показано, что прочность сцепления металлических покрытий после иглофрезерования не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к большинству деталей узлов трения. Процесс иглофрезерования можно рекомендовать только для подготовки поверхности перед нанесением коррозионностойких полимерных покрытий.

Ключевые слова: иглофрезерование, шероховатость, газотермическое напыление, покрытия, адгезия

Введение. Одним из основных факторов, определяющих 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, струйно-абразивную и дробеметную обработки). Применение механической обработки позволяет обеспечить чистоту и шероховатость поверхности изделия перед нанесением покрытия.

Создание высокопроизводительных технологий газотермического напыления покрытий обуславливает необходимость разработки 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.

В данной статье представлены результаты зависимости параметров шероховатости металлических поверхностей и прочности сцепления нанесенных металлических и полимерных покрытий от различных режимов иглофрезерования.

Оборудование, материалы и методики исследования. Обработку плоских поверхностей образ-

цов иглофрезерованием выполняли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Использовали иглофрезу (рисунок 1) 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 (ГОСТ 1050-88), 12ХН3А (ГОСТ 4543-71), чугуны СЧ15, СЧ25 (ГОСТ 1412-85), ВЧ50 (ГОСТ 7293-85) и латунь ЛС64-2 (ГОСТ 1020-77).

Для оценки шероховатости поверхности после иглофрезерования был использован, 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 $Z(x)$ профиля внутри элементарного отрезка lr (рисунок 2):

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

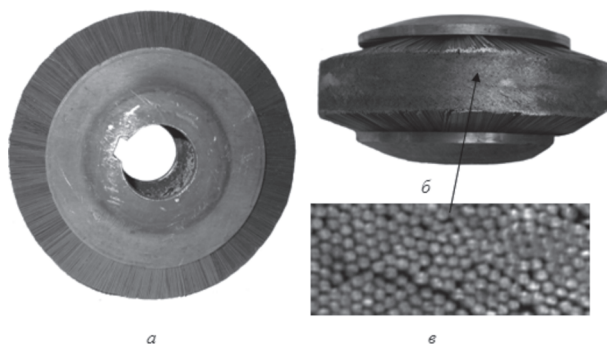


Рисунок 1 — Иглофреза:
а, б — внешний вид; в — вид на рабочую поверхность ($\times 20$)

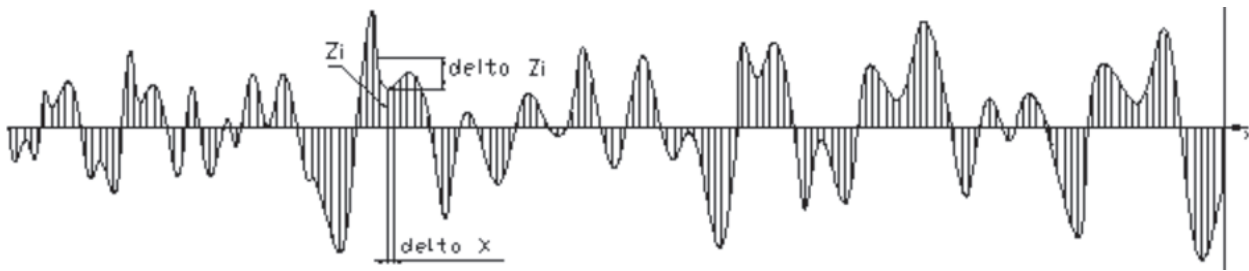


Рисунок 2 — Схема к расчету Ra

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 (НПО «Планар») с увеличением до 1200 крат и преобразователя изображения с помощью цифровой камеры «Никон» с разрешением 4,5 млн пиксель и последующей передачей изображения на ПЭВМ.

Газотермическое напыление осуществляли с использованием двух технологий: газопламенного напыления порошков полимерных материалов [2] и гиперзвуковой металлизации [3]. Применяемое оборудование разработано и изготовлено в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси. Наносимые материалы: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиэтилентерефталат, сталь 12Х18Н10Т, бронза БрКМц 3–1.

Прочность сцепления оценивали с использованием штифтовой методики [4], путем отрыва штифта нормально приложенной нагрузкой.

Результаты и их обсуждение. Для определения влияния параметров режима иглофрезерования на изменение характеристик топографии поверхности использовали математическое планирование эксперимента [5]. При планировании исследований применяли метод ЛП_т-последовательностей. В этом случае точки реализации экспериментов располагаются в многомерном пространстве таким образом, чтобы их проекции на оси $X_1-X_2, X_2-X_3, \dots, X_i-X_j$ 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 рисунке 3. 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 таблице 1, а условия проведения опытов приведены в таблице 2.

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 [6]

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

Тогда

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

Критерий минимизации записывается как

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

Расчетные значения Y рассматриваемой функции равны

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

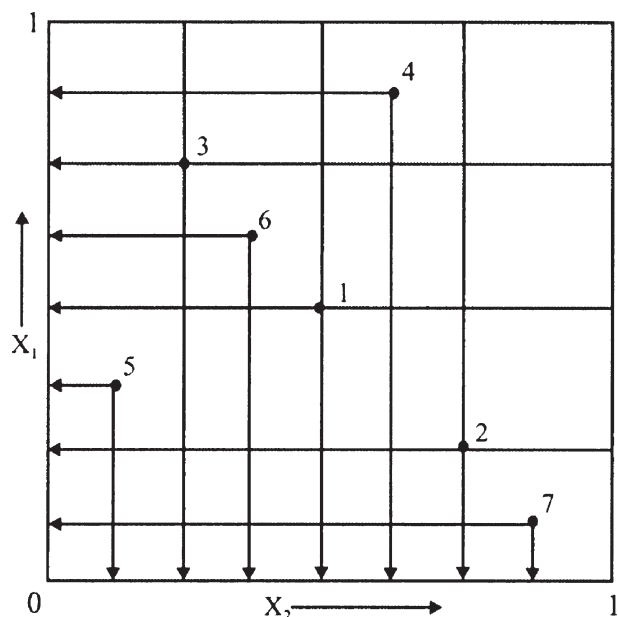


Рисунок 3 — Проекция семи точек на оси X_1 и X_2

Таблица 1 — Матрица планирования эксперимента

Фактор	Точки исследований						
	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

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

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

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 12ХНЗА

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

- сталь 45

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

Одномерные сечения функций отклика представлены на рисунке 4.

Аналогичным образом были разработаны математические модели (11)–(14) влияния параметров режима обработки на изменение шероховато-

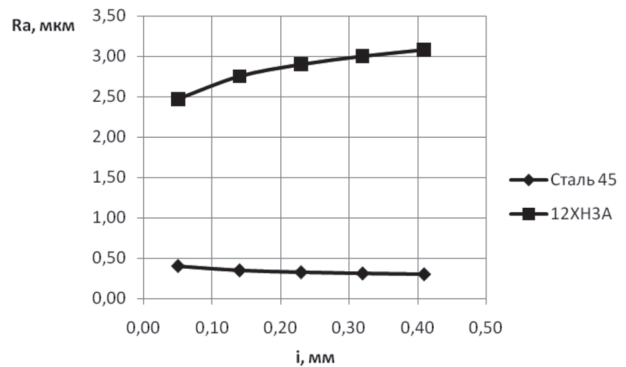
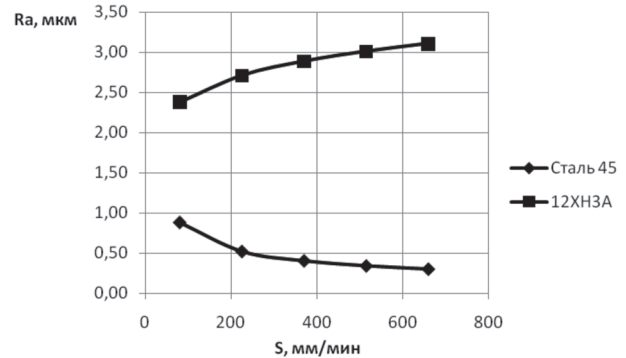
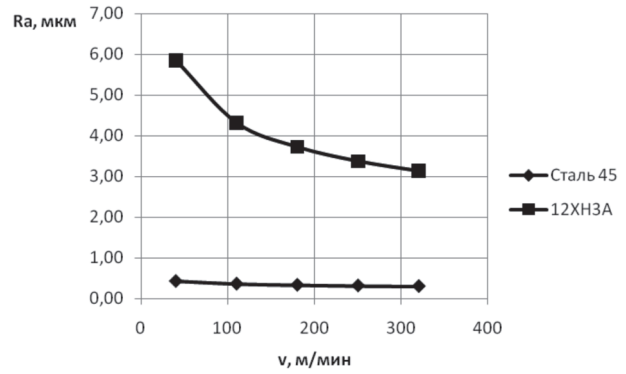


Рисунок 4 — Влияние скорости резания v , подачи S , натяга i на изменение шероховатости поверхности Ra для сталей

сти поверхности Ra для чугунов СЧ15, СЧ25, ВЧ50 и латуни ЛС64-2:

- СЧ15

$$Ra = 2,06V^{0,011} S^{0,1411} i^{0,285}; \quad (11)$$

- СЧ25

$$Ra = 2,53V^{-0,006} S^{0,0151} i^{0,084}; \quad (12)$$

- ВЧ50

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

- ЛС64-2

$$Ra = 34,8v^{-0,240} S^{-0,274} i^{-0,188}. \quad (14)$$

Анализ полученных результатов показал, что повышение скорости и 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 таблицах 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 вели-

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

чины прочности сцепления металлических покрытий на отрыв не достаточно высоки. Так, при нанесении покрытия газопламенным распылением проволоки или электродуговой металлизацией используется струйно-абразивная подготовка, которая обеспечивает адгезию 25–40 МПа [7]. 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 подложки. Расплавленные частицы не успевают 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 [8].

Заключение. В результате выполненных исследований установлено влияние режимов иглофрезерования на величину шероховатости поверхностей сталей, чугунов и латуни ЛС64-2. Показано, что 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. 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.

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
Полиэтилен-терефталат	Обезжиривание	3,9	3,7	3,9
	Иглофрезерование	7,0	6,6	6,8

Список литературы

1. Формирование качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при иглофрезеровании и комбинированной обработке иглофрезированием и поверхностным пластическим деформированием: монография / И.Л. Баршай, В.К. Шелег, Е.Э. Фельдштейн. — Минск: БНТУ, 2009. — 231 с.
2. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное напыление покрытий порошками полимеров / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2007. — № 6. — С. 19–23.
3. Черепко, А.Е. Технологии гиперзвуковой металлизации / А.Е. Черепко, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Механика-2011: сб. науч. докл. V Белорус. конгресса по теоретич. и прикладной механике, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси: редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2011. — Т. 2. — С. 138–143.
4. Khameneh, Sh. Effect of grit-blasting parameters on the surface roughness and adhesion strength of sprayed coating / Sh. Khameneh, M. Heydarzadeh // Surface and Interface Analysis. — 2010. — Vol. 42, No 6–7. — Pp. 551–554.
5. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. — Минск: Выш. шк., 1985. — 286 с.
6. Поллард, Д. Справочник по вычислительным методам статистики / Д. Поллард; перевод с англ. В.С. Занадворова. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 344 с.
7. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. — Минск: Технопринт. — 2004. — 200 с.
8. Голопятин, А.В. Влияние морфологии поверхности элементов трибосистемы на адгезию напыленных полимерных композиций / А.В. Голопятин // Механика машин. Теория и практика: материалы междунар. науч.-техн. конф. — Минск: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2003. — С. 382–389.

Belotserkovsky M.A., Sheleg V.K., Konovalova E.F.

Evaluation of the using the needle-milling process for surface preparation in thermal spraying technologies

The results of researches of metal surfaces roughness and adhesion of thermal spray coatings after needle-milling of the metal substrate are presented. The optimal parameters of the process to ensure maximum roughness are defined. It is shown that the strength of adhesion of metallic coatings after needle-milling does not satisfy the requirements of most parts of friction. The needle-milling process may be recommended for surface preparation prior to application of corrosion-resistant polymeric coatings only.

Keywords: *The needle-milling, the roughness, the gas-thermal spraying, the coatings, the adhesion*

Поступила в редакцию 08.08.2014.