

УДК 621.924

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 12ХНЗА ПРИ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИИ

*Доктора техн. наук, проф. БАРШАЙ И. Л., ФЕЛЬДШТЕЙН Е. Э.,
инж. ГОНЧАРОВ С. П.*

*Белорусский национальный технический университет,
Зеленогурский технический университет (Польша),
РУП «МТЗ»*

Повышение конкурентоспособности промышленной продукции, выпускаемой в Республике Беларусь, предопределяет необходимость интенсивного поиска эффективных научно-технических решений по увеличению срока службы машин, механизмов и оборудования за счет разработки и применения высокопроизводительных малоотходных и безотходных, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий.

Топография поверхности влияет на прочность деталей, работающих в условиях циклической и знакопеременной нагрузки. Впадины микропрофиля являются своеобразными надрезами на поверхности и в значительной степени влияют на концентрацию напряжений и образование усталостных трещин. Шероховатость поверхностей уменьшает фактическую площадь контакта. Несущая способность детали зависит от шероховатости и метода обработки. Установлено, что 70–80 % вариаций показателей износостойкости связаны с параметрами шероховатости поверхности деталей машин [1]. Коррозия в атмосферных условиях возникает легче и распространяется быстрее на поверхностях, имеющих значительную шероховатость.

Одним из перспективных методов обработки для формирования качества поверхности деталей машин является иглофрезерование. Этот метод обработки характеризуется микрорезанием в зоне взаимодействия режущих элементов с поверхностью детали. В настоящее время научно-исследовательскими и проектными организациями, предприятиями Россий-

ской Федерации, а также США, ФРГ, Японии, Болгарии и других стран разрабатываются основы прогрессивной обработки иглофрезерованием, проектируются и внедряются иглофрезерные станки.

Достигаемая при иглофрезеровании высота микронеровностей находится в пределах Ra 100–0,32 мкм и определяется сочетанием технологических факторов [2–4]. Иглофрезерование в значительной степени аналогично процессам фрезерования и шлифования, так как при всех указанных способах обработки имеет место дискретный контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью. Кроме этого, с фрезерованием иглофрезерование сближает и то, что резание производится металлическими проволочными элементами, с процессом шлифования – количество режущих элементов, наличие отрицательных углов резания, а иногда и размеры стружки [2, 3]. Важное преимущество иглофрез – их высокая долговечность. В производственных условиях их работоспособность доходит до 2000 ч [3]. Существенное влияние на долговечность иглофрез оказывают конструктивные параметры: диаметр проволочных элементов; свободная длина элементов; плотность набивки пакета элементов, зависящая от усилия прессования при сборке. Плотность набивки пакета элементов определяется соотношением суммарной площади поперечного сечения всех элементов пакета к площади рабочей поверхности иглофрезы [3]. Предусмотрено изготовление иглофрез с плотностью набивки 70–80 % (ТУ 102-277–80). Особенность геомет-

рии режущих элементов иглофрезы – незначительный радиус закругления режущей кромки, которая в процессе работы самозатачивается (рис. 1). Это обеспечивает при реверсировании вращения инструмента его работу без переточек.

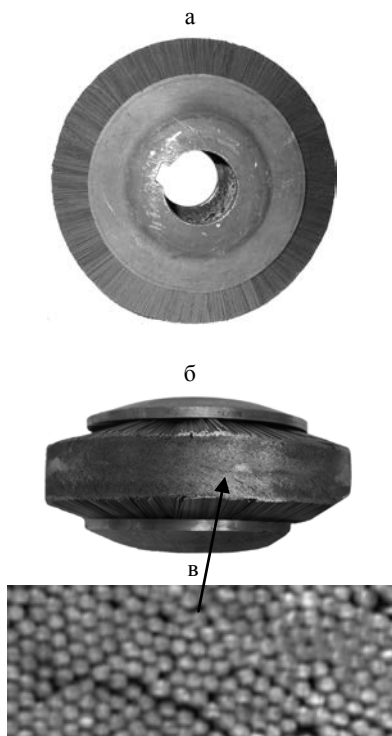


Рис. 1. Иглофреза: а – внешний вид; б и в – рабочая поверхность иглофрезы (x20)

Положительным фактором иглофрезерования является возможность использования металлической стружки, составляющей в отдельных случаях до 5 % массы обрабатываемой детали. Стружку применяют в порошковой металлургии [5, 6]. Это обстоятельство свидетельствует о возможности создания мало- и безотходных процессов изготовления деталей машин в результате применения иглофрезерования.

Имеющиеся данные о процессах в зоне обработки при иглофрезеровании недостаточны и требуют дополнения. Ограничена информация о влиянии режимов обработки на формирование качества поверхности и эксплуатационные характеристики деталей, отсутствуют сведения об управлении данным процессом. Все это сужает возможные области применения иглофрезерования. Потребность в решении комплекса научных, технологических и конструкторских

задач обеспечения качества деталей для широкого применения указанного процесса определяет актуальность данных исследований.

Параметры режима иглофрезерования: скорость резания (v , м/мин), подача ($S_{пр}$, мм/мин), натяг в системе «рабочая поверхность иглофрезы – обрабатываемая поверхность» (i , мм). Скорость резания – один из основных технологических факторов, определяющих эффективность работы иглофрезы. Этот фактор в основном зависит от вязкости обрабатываемого материала. Параметры иглофрезерования в настоящее время определяют экспериментально в зависимости от конкретных условий и требуемого качества поверхности [4].

Для определения влияния параметров режима иглофрезерования на изменение топографии поверхности использовали математическое планирование эксперимента [7, 8]. 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 семи точек на оси X_1 и X_2 изображен на рис. 2. Матрица планирования экспериментов (условия проведения) представлена в табл. 1 Реализованные сочетания параметров режима иглофрезерования в соответствии с матрицей планирования приведены в табл. 2.

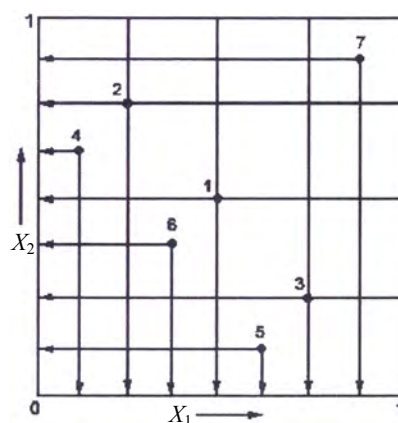


Рис. 2. Проекция семи точек на оси X_1 и X_2

Результаты ранее выполненных исследований [9] позволили выбрать следующие значения параметров режима иглофрезерования, принятые

за основной уровень в данном эксперименте: $v = 330$ м/мин; подачу $S = 660$ мм/мин и натяг $i = 0,45$ мм.

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	0,37	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	169	330	0,22
2	84	530	0,11
3	253	170	0,34
4	295	400	0,06
5	127	85	0,28
6	211	270	0,17
7	42	690	0,39

В тех случаях, когда характер исследуемых зависимостей неизвестен, при решении технологических задач для моделирования исследуемого процесса широко используются уравнения множественной регрессии:

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

Их можно привести к линейному виду путем логарифмирования с последующим использованием метода наименьших квадратов. В случае применения ЭВМ можно воспользоваться методикой [8]. В этом случае находят матрицу X , векторы y , Y и b в виде:

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

Тогда:

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

Критерий минимизации записывается как

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

Расчетные значения Y исследуемой функции равны

$$Y = Xb.$$

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:

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

Тогда уравнения метода наименьших квадратов в матричном виде могут быть записаны следующим образом:

$$b = S^{-1} X^T y.$$

Обработку плоских поверхностей образцов иглофрезерованием выполняли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Использовали иглофрезу диаметром $D = 150$ 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 – конструкционная сталь: 12ХН3А (ГОСТ 4543–71).

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, включающий следующие характеристики: среднее арифметическое отклонение профиля Ra , высоту десяти точек отклонений от регулярного профиля Rz , стандартное отклонение профиля Rq , общую высоту профиля Rt , максимальную высоту выступов профиля Rp , максимальную глубину впадин профиля Rv , среднюю высоту элементов профиля Rc , среднюю ширину элементов профиля RSm , относительную опорную длину профиля $Rmr(c)$.

Измерение характеристик шероховатости поверхностей образцов до и после иглофрезе-

рования выполняли на компьютеризованном приборе TR-200 (рис. 3).



Рис. 3. Прибор для измерения шероховатости поверхности TR-200

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 ЭВМ (рис. 4).



Рис. 4. Комплекс для макро- и микроанализа и топографии поверхности

Анализ результатов эксперимента (рис. 5) свидетельствует о следующем.

Минимальные значения исследуемых высотных характеристик шероховатости поверхности после иглофрезерования получены при параметрах режима обработки: $v = 295$ м/мин; $S = 400$ мм/мин; $i = 0,06$ мм (табл. 1, опыт 4); максимальные – при $v = 42$ м/мин; $S = 690$ мм/мин; $i = 0,39$ мм (табл. 1, опыт 7). Ми-

нимальные значения шаговой характеристики RSm были зафиксированы в четвертом опыте при обработке на следующих режимах: $v = 295$ м/мин; $S = 400$ мм/мин; $i = 0,06$ мм, максимальные – в опыте 7. Минимум значения относительной опорной длины профиля $Rmr(c)$ на уровне 50 % был получен в опыте 6 ($v = 211$ м/мин; $S = 270$ мм/мин; $i = 0,17$ мм); максимум – во втором ($v = 84$ м/мин; $S = 530$ мм/мин; $i = 0,11$ мм).

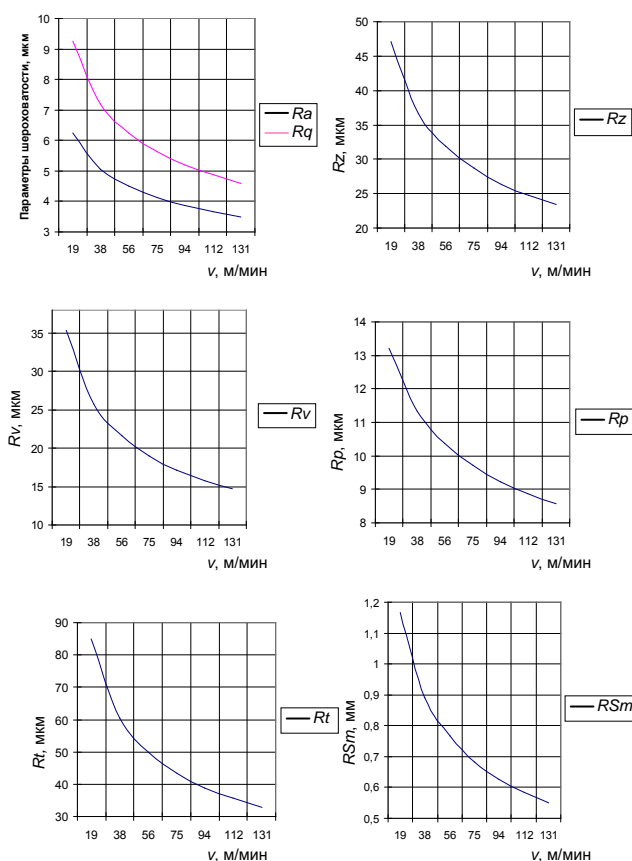


Рис. 5. Влияние скорости резания v при иглофрезеровании на изменение характеристик шероховатости

После обработки экспериментальных данных были разработаны математические модели влияния параметров режима иглофрезерования на изменения исследуемых характеристик шероховатости поверхности в виде уравнений регрессии (1)–(8). Данные модели позволяют рассчитать значение характеристик шероховатости поверхности при выбранном сочетании параметров режима обработки:

$$Ra = 8,52v^{-0,300}S^{0,126}i^{0,106}; \quad (1)$$

$$Rq = 12,0v^{-0,361}S^{0,170}i^{0,122}; \quad (2)$$

$$Rz = 46,5v^{-0,362}S^{0,226}i^{0,153}; \quad (3)$$

$$Rt = 112v^{-0,489}S^{0,260}i^{0,229}; \quad (4)$$

$$Rp = 14,1v^{-0,224}S^{0,159}i^{0,216}; \quad (5)$$

$$Rv = 35,8v^{-0,455}S^{0,265}i^{0,138}; \quad (6)$$

$$Rc = 1,17v^{-0,491}S^{0,291}i^{0,425}; \quad (7)$$

$$RSm = 3,45v^{-0,389}S^{0,133}i^{0,469}. \quad (8)$$

Графическое изображение моделей (1)–(8) представлено одномерными сечениями функций отклика на рис. 5–7.

Шероховатость обработанной поверхности зависит от динамических углов проволочного элемента иглофрезы (γ и α), формируемых в процессе обработки [4]. Значения этих углов определяются упругой деформацией проволочных элементов инструмента. В свою очередь упругая деформация проволочных элементов зависит от параметров режима иглофрезерования. Увеличение значений параметров режима обработки приводит к росту углов γ и α . Так, в частности, при формировании динамического переднего угла $\gamma > -20^\circ$ процесс микрорезания переходит в субмикрорезание и пластическое деформирование обрабатываемой поверхности.

Рост скорости иглофрезерования способствует снижению высотных Ra , Rz , Rt , Rp , Rv , Rq и Rc и шаговой RSm характеристик шероховатости в 1,5–3,6 раза по сравнению с исходными (до обработки) значениями. Выявленный характер изменения характеристик шероховатости в зависимости от скорости обработки объясняется присущим иглофрезерованию «краевым» эффектом [3]. Этот эффект заключается в следующем. Крайние со стороны обрабатываемой поверхности проволочные элементы (микрорезцы) имеют изгиб в направлении подачи заготовки большой, так как обладают меньшей жесткостью, чем весь пакет проволочных элементов. В результате они формируют микроцарапины (следы своего движения) на обрабатываемой поверхности.

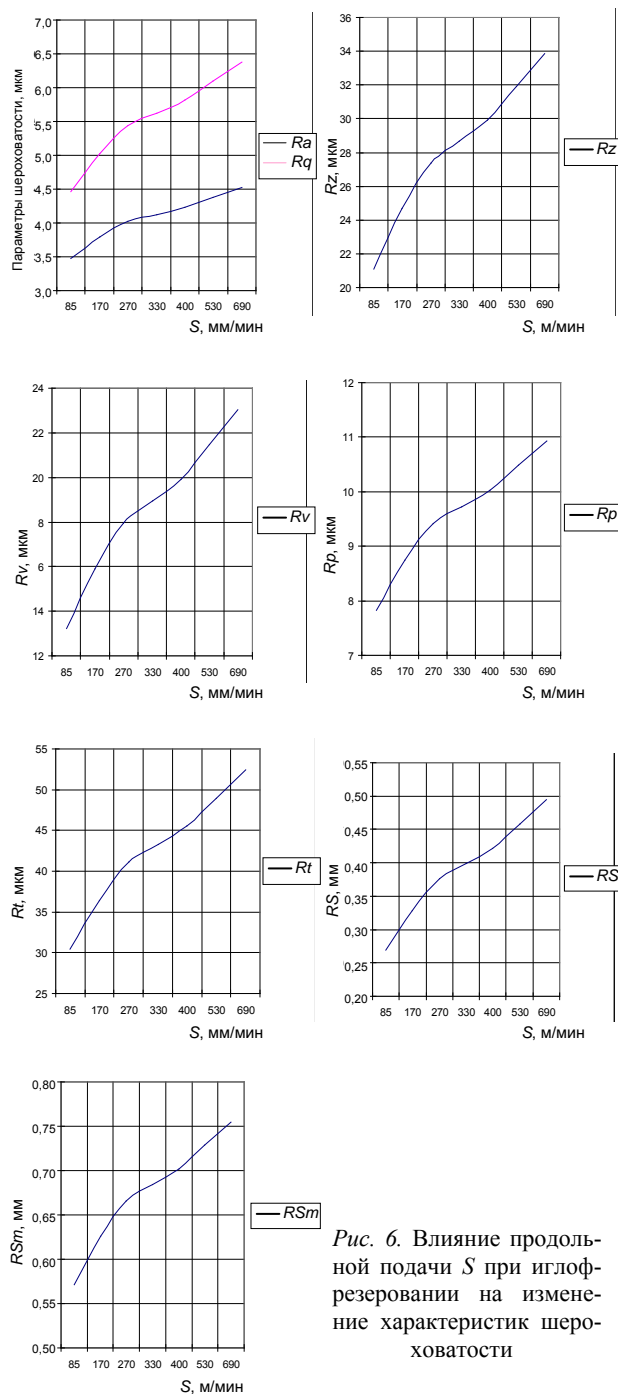


Рис. 6. Влияние продольной подачи S при иглофрезеровании на изменение характеристик шероховатости

Повышение продольной подачи ведет к увеличению исследуемых характеристик шероховатости. Это объясняется ростом сил резания, увеличением угла упругого деформирования проволочного элемента и переходом процесса субмикрорезания к микрорезанию.

Увеличение натяга i в системе «обрабатываемая поверхность – рабочая поверхность иглофрезы» способствовало росту всех исследуемых характеристик шероховатости. Рост ука-

занного параметра режима обработки приводит к преобладающему влиянию процесса микро-резания и в меньшей степени пластического деформирования обрабатываемой поверхности, вызываемого ударным воздействием проволочных элементов иглофрезы.

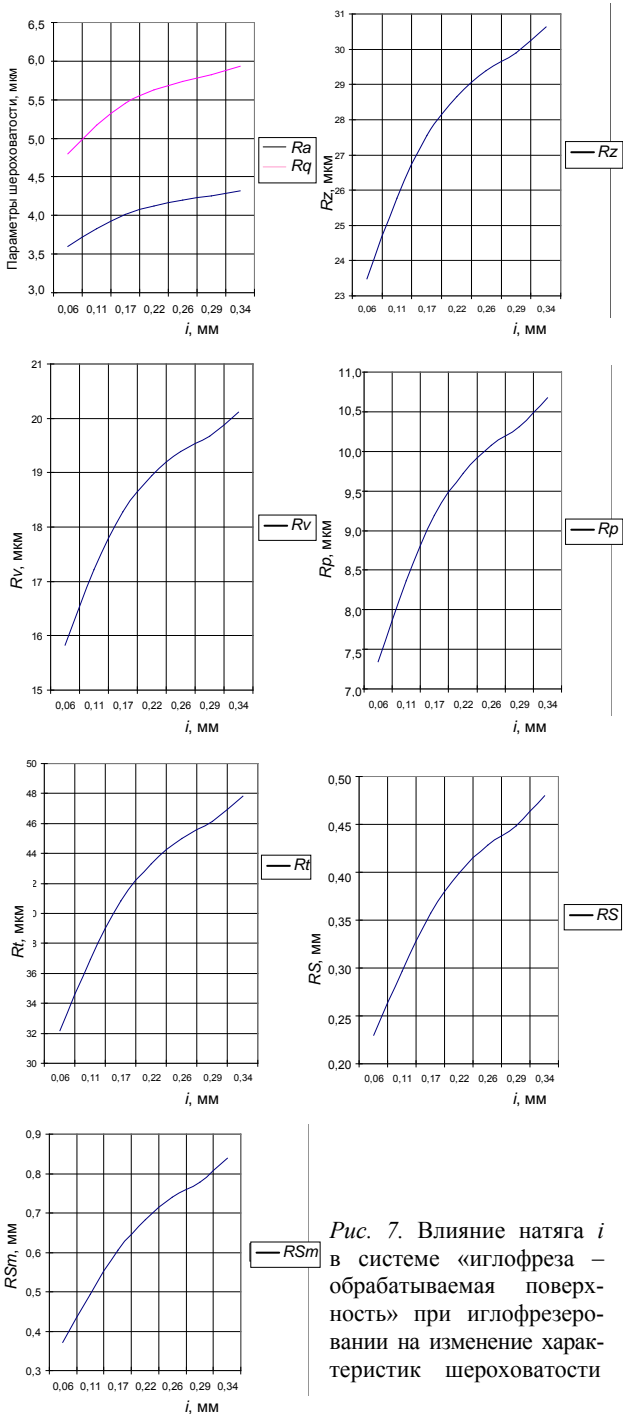


Рис. 7. Влияние натяга i в системе «иглофреза – обрабатываемая поверхность» при иглофрезеровании на изменение характеристик шероховатости

Минимум значения относительной опорной длины профиля $Rmr(c)$ на уровне 50 % был получен в опыте 1 – 50 % ($v = 169$ м/мин;

$S = 330$ мм/мин; $i = 0,22$ мм). Максимум – 90 % в опыте 6 ($v = 84$ м/мин; $S = 530$ мм/мин; $i = 0,11$ мм).

На рис. 8 представлена топография поверхности образцов из стали 12ХН3А до обработки, а на рис. 9, 10 – после обработки.

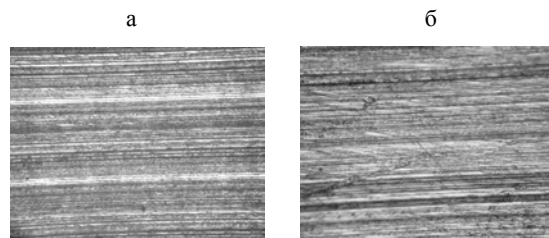


Рис. 8. Фото топографии поверхности образцов из стали 12ХН3А до иглофрезерования: а – $\times 65$; б – $\times 250$

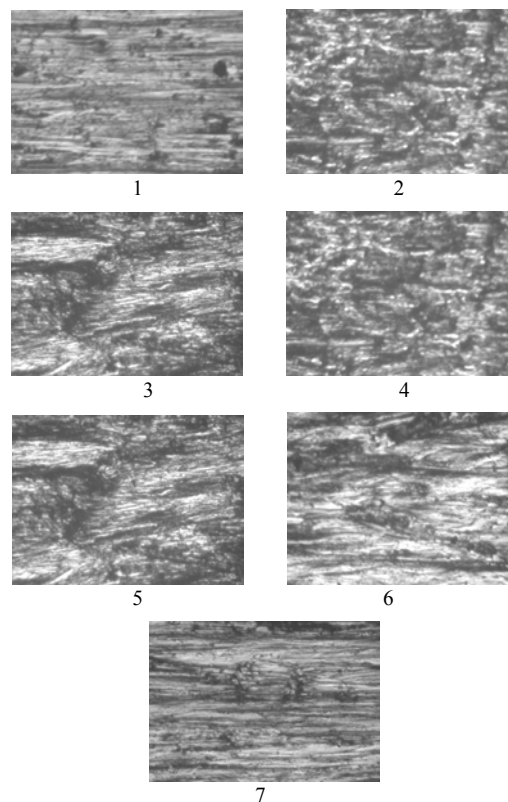


Рис. 9. Фотографии топографии поверхности образцов из стали 12ХН3А после иглофрезерования ($\times 65$) в соответствии с условиями опытов (табл. 2)

Результаты изучения топографии обработанной поверхности позволяют сделать вывод о том, что после иглофрезерования следы от проволочных элементов на поверхности произвольно изменяют свое направление. На поверхности формируются расположенные случайным образом выступы, впадины, риски.

ЛИТЕРАТУРА

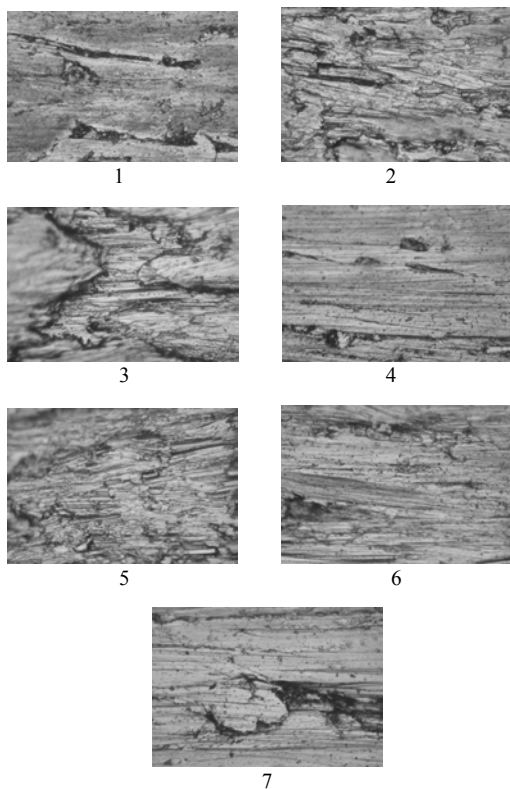


Рис. 10. Фотографии топографии поверхности образцов из стали 12ХНЗА после иглофрезерования ($\times 250$) в соответствии с условиями опытов (табл. 2)

ВЫВОД

Разработанные математические модели позволяют оптимизировать параметры режима иглофрезерования в зависимости от требований к шероховатости поверхности деталей.

1. **Технологические** основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников [и др.]; под общ. ред. К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

2. **Салуквадзе, В. С.** Иглофрезерная обработка поверхности металлов / В. С. Салуквадзе, В. М. Коптев // Экспресс-информация. Серия ХМ-9. – М.: ЦНИТИхимнефтемаш, 1986. – № 2. – С. 8.

3. **Салуквадзе, В. С.** Изменение свойств в поверхностном слое сплавов при иглофрезерной обработке / В. С. Салуквадзе, И. А. Другова // Расчет, сооружение и эксплуатация магистральных газопроводов. – М.: ВНИИСТ, 1980. – С. 93–102.

4. **Жоров, Ю. С.** Качество поверхности при иглофрезеровании / Ю. С. Жоров, В. А. Балдаев // Механизация тяжелых и трудоемких процессов в судостроении. – Л.: Румб, 1987. – С. 125–132.

5. **Моргулис, А. М.** Повышение эффективности диспергирования металлов методом иглофрезерования / А. М. Моргулис, Л. Н. Корчанова // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. – М.: НИИИзмаш, 1982. – № 2. – С. 3–4.

6. **Schowoor, W.** Nadelfrasen-Eigenschaften und Ausichten / W. Schowoor, R. E. Koch // Fertigungstechnik und Betrieb. – 1982. – 32. – № 6. – P. 343–349.

7. **Ящерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Вышэйш. шк., 1985. – 286 с.

8. **Поллард, Д.** Справочник по вычислительным методам статистики / Д. Поллард; пер. с англ. В. С. Западворова. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

9. **Баршай, И. Л.** Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом / И. Л. Баршай. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 244 с.

Поступила 2.02.2007

УДК 662.7

РАСЧЕТ ПОЛНОТЫ РЕАКЦИЙ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВОДОУГОЛЬНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

Канд. техн. наук, доц. НАЗАРОВ Н. С., инж. НАЗАРОВ И. Н.

Белорусский национальный технический университет

В [1] показано, что водоугольная газификация (ВУГ) углерода твердого топлива высокотемпературным паром, или (что одно и то же) разложение воды (высокотемпературного пара)

углеродом твердого топлива, описывается тремя химическими уравнениями:

