

ческой системы либо при ее известных характеристиках назначить разрешенные режимы резания.

3. При высокоскоростном фрезеровании наиболее эффективно использовать монокристаллические фрезы из твердого сплава с покрытием из алумонитрида титана, нитрида карбида титана или нитрида титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев, А. SURFCAM 2002 plus. / А. Николаев // Что нового? САПР и графика. – 2003. – № 6. – С. 43–47.
2. Степанов, А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве / А. Степанов // CAM/CAE Observer. – 2003. – № 4. – С. 2–8.
3. Zelinski, P. Five sides and one zero: Shopfloor

programming for five-side parts. Mod. Mach. / P. Zelinski // Shop. – 2003. – 76. – № 7. – С. 54–55.

4. Hans, B. Kief. CNC for Industry / Hans B. Kief. – 2000. – P. 198.

5. Smith S. Тенденции развития высокоскоростной обработки / S. Smith // ASME: Journal of Manuf. Science, 2002. – №. 4, V. 119. – С. 664–666.

6. Popoli, B. Шпиндели для высокоскоростной обработки / B. Popoli // Tooling & Production. – 2002. – №. 5, V. 68. – С. 60–62.

7. Pontius, K. Высокоскоростное фрезерование заготовок из разнородных деталей / K. Pontius // Cutting Tool Engineering. – 2002. – №. 2, V. 54. – С. 41–43.

Поступила 01.04.2009

УДК 621.762

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНОВ ПРИ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИИ

*Доктора техн. наук, профессора БАРШАЙ И. Л., ФЕЛЬДШТЕЙН Е. Э.,
инженеры БИРИЧ А. В., ГОНЧАРОВ С. П.*

*Белорусский национальный технический университет,
Зеленогурский университет (Польша),
ИОО «Ист Юропан Партс», 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 мало- и безотходных, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий.

Качество поверхности в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики деталей машин. По данным [1], методы формирования качества поверхности деталей машин составляют 10–20 % общей трудоемкости их изготовления. Приведенные в этой работе результаты анализа технологических процессов изготовления деталей машин в различных отраслях машиностроения показали, что такой обработке подвергаются 85–95 % выпуска-

емых деталей. Обработка проволочным инструментом, в частности иглофрезой, является перспективным методом для формирования качества поверхности деталей.

Формирование топографии и геометрической структуры поверхности при иглофрезеровании осуществляется в режиме микрорезания в зоне взаимодействия режущих элементов с поверхностью заготовки. При иглофрезеровании, кроме уменьшения высоты микронеровностей до $Ra = 40$ мкм, в поверхностном слое формируется наклеп. Степень наклепа иглофрезерованной поверхности достигает 40 % [2]. Варьирование параметров режима иглофрезерования позволяет управлять формированием качества обработанной поверхности детали, а следовательно, ее эксплуатационными показателями.

Исследовали влияние параметров режима

иглофрезерования: скорости резания v , подачи S и натяга i в системе «обрабатываемая поверхность – рабочая поверхность иглофрезы» на формирование качества поверхности. Обрабатываемые материалы – чугуны: СЧ15, СЧ25 (ГОСТ 1412–85), ВЧ50 (ГОСТ 7293–85). Из указанных материалов были изготовлены призматические образцы (15×20×10 мм). Применяли иглофрезу диаметром $D = 125$ мм, шириной $B = 20$ мм и плотностью набивки проволочных элементов 80 %. Диаметр единичного проволочного элемента (микрорезца) $d = 0,3$ мм, свободный вылет $l = 20$ мм. Обработку плоских поверхностей образцов иглофрезерованием выполняли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г.

При изучении топографии поверхности был использован комплекс для микро- и макроанализа поверхности на базе микроскопа МКИ-2М-1 с увеличением до 1200 крат, преобразователя изображения с помощью цифровой камеры «Никон» с разрешением 4,5 млн пиксель и последующей передачей изображения на ЭВМ. Оценку геометрической структуры поверхности осуществляли на основе действующего в настоящее время комплекта международных норм – ISO 3274:1997 и ISO 4287:1998. Под геометрической структурой понимается объединение всех неровностей поверхности. При проведении экспериментов определяли формирование следующих характеристик геометрической структуры поверхности в зависимости от параметров режима иглофрезерования: среднего арифметического отклонения профиля Ra , стандартного отклонения профиля Rq , высоту десяти точек отклонений от регулярного профиля Rz , максимальную высоту выступов профиля Rp , максимальную глубину впадин профиля Rv , среднюю ширину элементов профиля RSm . Определение этих характеристик осуществляли с помощью мобильного прибора класса точности 1 Hommel tester T500. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3.

Разработку математических моделей влияния параметров режима иглофрезерования на изменение исследуемых параметров качества поверхности выполняли на основе математического планирования эксперимента [3]. Применяли метод ЛП_т-последовательностей. В этом случае точки реализации экспериментов располагаются в многомерном пространстве таким образом, чтобы их проекции на осях $X_1 - X_2$,

$X_2 - X_3$, ..., $X_i - X_j$ располагались на равном расстоянии друг от друга. Координаты точек рассчитывались из условия $X_{\min} = 0$ и $X_{\max} = 1$. Пример проекции семи точек на осях X_1 и X_2 изображен на рис. 1. Результаты ранее выполненных исследований [4] позволили выбрать следующие значения параметров режима иглофрезерования, принятые за основной уровень в данном эксперименте: $v = 280$ м/мин; $S_{\text{пр}} = 420$ мм/мин и $i = 0,3$ мм. Матрица планирования эксперимента (условия проведения опытов) представлена в табл. 1, а условия проведения опытов – в табл. 2.

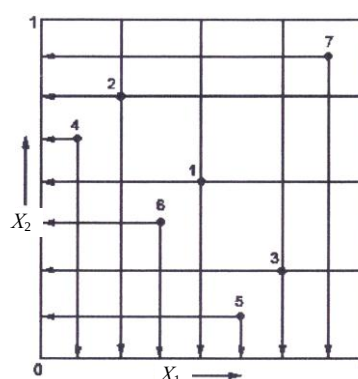


Рис. 1. Проекция семи точек на осях X_1 и X_2

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	140	210	0,15
2	70	135	0,08
3	210	170	0,22
4	255	530	0,04
5	105	35	0,19
6	175	210	0,11
7	35	85	0,26

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

$$y = C \prod x_i^{m_i} \text{ и } y = \exp(b_0 + S b_i x_i). \quad (1)$$

Их можно привести к линейному виду путем логарифмирования с последующим использованием метода наименьших квадратов. В случае применения ЭВМ можно воспользоваться методикой Д. Полларда [5]

$$x = \begin{pmatrix} 1 \dots x_1 \\ \dots \\ 1 \dots x_i \\ \dots \\ 1 \dots x_n \end{pmatrix}; \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_i \\ \dots \\ Y_n \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_i \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Тогда

$$Xb = \begin{pmatrix} b_0 + b_i x_1 \\ \dots \\ b_0 + b_i x_i \\ \dots \\ b_0 + b_i x_n \end{pmatrix}; \quad y - Xb = \begin{pmatrix} y_1 - b_0 - b_i x_1 \\ \dots \\ y_i - b_0 - b_i x_i \\ \dots \\ y_n - b_0 - b_i x_n \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Критерий минимизации записывается следующим образом:

$$(y - Xb)^T (y - Xb) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Расчетные значения Y рассматриваемой функции

$$Y = Xb. \quad (5)$$

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:

$$S = \begin{pmatrix} n \dots \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i \dots \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{pmatrix}; \quad X^T y = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Тогда уравнения метода наименьших квадратов в матричном виде могут быть записаны

$$b = S^{-1} X^T y. \quad (7)$$

На рис. 2 изображена топография поверхности образцов из СЧ25 до обработки. Топография поверхности образцов до иглофрезерования из других исследуемых марок чугунов аналогична приведенной.

На рис. 3 представлены фотографии топографии поверхности образцов после иглофрезерования. Изучение топографии обработанной

поверхности образцов позволяет сделать вывод о том, что после иглофрезерования следы от проволоочных элементов на поверхности произвольно изменяют свое направление. На поверхности формируются расположенные случайным образом выступы и впадины, риски. Поверхность образцов из исследованных марок чугунов после иглофрезерования стала более гладкой, без резких впадин и выступов.

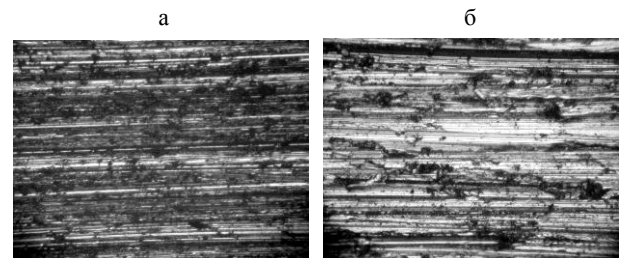


Рис. 2. Фото топографии поверхности образцов из СЧ25 до иглофрезерования: а – $\times 65$; б – $\times 250$

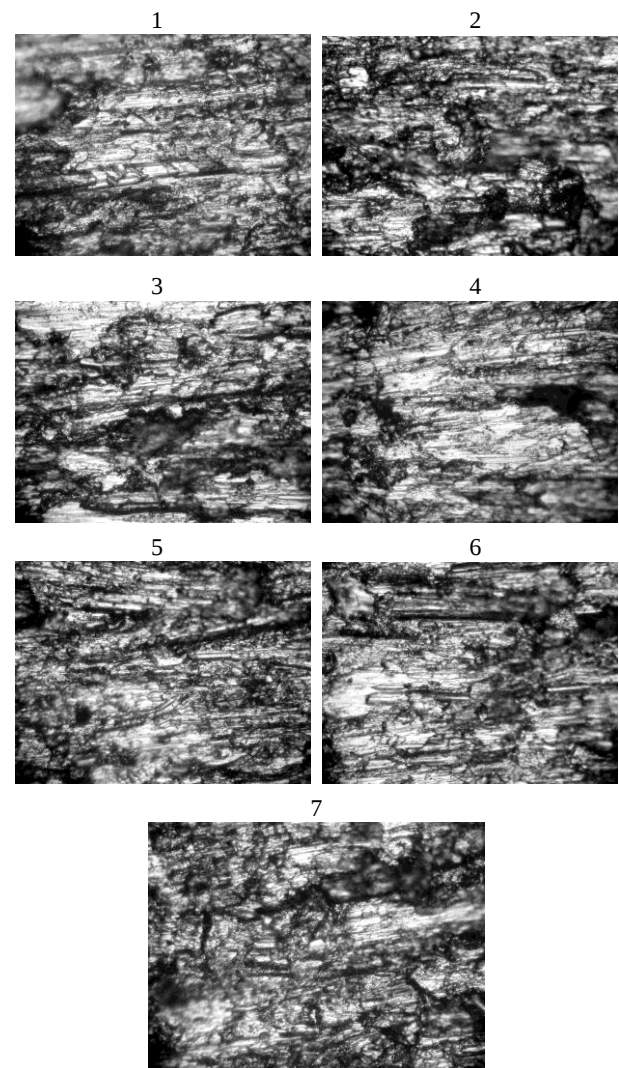


Рис. 3. Фото топографии поверхности образцов из СЧ25

после иглофрезерования (цифры соответствуют номерам опытов в табл. 2), $\times 250$

Минимальные значения исследуемых характеристик геометрической структуры получены при обработке образцов из высокопрочного чугуна ВЧ50 в 4-м опыте, а для образцов из СЧ15 и СЧ25 – в 5-м. Полученные результаты объясняются тем, что при обработке хрупких материалов, какими являются чугуны, наряду со срезом отдельных частиц металла происходит их сдвиг и беспорядочное хрупкое скалывание от основной массы металла, увеличивающее шероховатость поверхности. Повышение скорости резания уменьшает скалывание частиц материала, и обрабатываемая поверхность становится более гладкой. Хрупкость чугуна марки ВЧ50 превышает хрупкость чугунов марок СЧ15, поэтому иглофрезерование с высокой скоростью резания и подачи (табл. 2, 4-й опыт) обеспечило минимальные значения высотных параметров геометрической структуры поверхности образцов из чугуна марки ВЧ50.

Геометрическая структура обработанной поверхности зависит от углов проволоочного элемента инструмента (γ и α), формируемых в процессе обработки [3]. Значения этих углов определяются его упругой деформацией. В свою очередь упругая деформация проволоочных элементов зависит от параметров режима обработки. Увеличение значений параметров режима обработки приводит к росту углов γ и α . Так, при формировании переднего угла $\gamma > (-20^\circ)$ процесс микрорезания переходит в субмикрорезание и пластическое деформирование обрабатываемой поверхности.

Рост скорости обработки v способствует снижению высотных Ra , Rz , Rt , Rp , $R\gamma$, Rq , Rc и шаговой RSm характеристик геометрической структуры в 1,5–3,6 раза по сравнению с исходными (до обработки) значениями. Выявленный характер изменения характеристик геометрической структуры в зависимости от скорости v объясняется присущим обработке проволочным инструментом «краевым» эффектом [3]. Этот эффект заключается в следующем. Крайние со стороны обрабатываемой поверхности проволоочные элементы (микрорезцы) имеют больший изгиб в направлении подачи заготовки, так как обладают меньшей жесткостью, чем весь пакет проволоочных элементов. В результате они формируют микроцарапины на обраба-

тываемой поверхности. Повышение продольной подачи S ведет к увеличению исследуемых характеристик геометрической структуры, что связано с переходом процесса субмикрорезания к микрорезанию. Повышение натяга i в системе «обрабатываемая поверхность – рабочая поверхность инструмента» способствовало увеличению всех исследуемых характеристик геометрической структуры. Рост указанного параметра приводит к превалирующему влиянию процесса микрорезания и в меньшей степени – пластического деформирования обрабатываемой поверхности, вызываемого ударным воздействием проволоочных элементов инструмента.

Исходное (до обработки) среднее значение микротвердости образцов: СЧ15 – $H_{\mu} = 3817$ МПа; СЧ25 – $H_{\mu} = 4093$ МПа; ВЧ50 – $H_{\mu} = 2973$ МПа. После иглофрезерования микротвердость поверхности образцов из исследуемых материалов зафиксирована в следующих пределах $H_{\mu} = 4124\text{--}7377$ МПа.

Анализ результатов эксперимента свидетельствует о том, что минимальное значение микротвердости поверхности ($H_{\mu} = 5367$ МПа) для образцов СЧ15 получено в 1-м опыте ($v = 140$ м/мин; $S = 195$ мм/мин; $i = 0,15$ мм); для образцов СЧ25 ($H_{\mu} = 4529$ МПа) и ВЧ25 ($H_{\mu} = 4124$ МПа) зафиксировано после иглофрезерования в 3-м опыте ($v = 210$ м/мин; $S = 98$ мм/мин; $i = 0,22$ мм). Максимальная микротвердость для всех исследуемых марок чугунов СЧ15 ($H_{\mu} = 6670$), СЧ25 ($H_{\mu} = 7377$ МПа) и ВЧ50 ($H_{\mu} = 5300$ МПа) сформирована во втором опыте ($v = 70$ м/мин; $S = 292$ мм/мин; $i = 0,08$ мм). Таким образом, степень наклепа для исследованных марок чугунов после иглофрезерования достигает: СЧ15 – 78 %; СЧ 25 – 80; ВЧ50 – 78 %.

На основе полученных результатов были разработаны математические модели влияния параметров режима обработки на изменение исследуемых характеристик геометрической структуры поверхности и микротвердости поверхности:

• СЧ25

$$Ra = 2,53v^{-0,006}S^{0,0151}i^{0,084}; \quad (8)$$

$$Rq = 3,15v^{0,005}S^{0,041}i^{0,085}; \quad (9)$$

$$Rz = 15,7v^{0,021}S^{-0,023}l^{0,028}, \quad (10)$$

$$Rp = 6,95v^{0,022}S^{-0,006}l^{0,050}, \quad (11)$$

$$Rv = 9,83v^{0,0195}S^{-0,037}l^{0,008}, \quad (12)$$

$$RSm = 15,7v^{0,021}S^{-0,023}l^{0,028}, \quad (13)$$

$$H\mu = 5280v^{0,064}S^{-0,0321}l^{-0,020}, \quad (14)$$

• СЧ15

$$Ra = 2,06v^{0,011}S^{0,1411}l^{0,285}, \quad (15)$$

$$Rq = 2,82v^{0,020}S^{0,107}l^{0,262}, \quad (16)$$

$$Rz = 14,1v^{-0,006}S^{0,087}l^{0,195}, \quad (17)$$

$$Rp = 4,66v^{-0,010}S^{0,159}l^{0,221}, \quad (18)$$

$$Rv = 9,83v^{-0,005}S^{0,048}l^{0,189}, \quad (19)$$

$$RSm = 0,0458v^{-0,061}S^{0,193}l^{0,027}, \quad (20)$$

$$H\mu = 5720v^{0,028}S^{-0,014}l^{0,009}, \quad (21)$$

• ВЧ50

$$Ra = 3,42v^{0,080}S^{-0,114}l^{0,055}, \quad (22)$$

$$Rq = 4,29v^{0,073}S^{-0,104}l^{0,068}, \quad (23)$$

$$Rz = 21,4v^{0,039}S^{-0,096}l^{0,067}, \quad (24)$$

$$Rp = 8,67v^{0,060}S^{-0,070}l^{0,097}, \quad (25)$$

$$Rv = 13v^{0,017}S^{-0,121}l^{0,037}, \quad (26)$$

$$RSm = 0,156v^{-0,051}S^{0,095}l^{0,166}, \quad (27)$$

$$H\mu = 3740v^{-0,0328}S^{0,051}l^{-0,059}. \quad (28)$$

Одномерные сечения функций отклика разработанных моделей представлены на рис. 4–7.

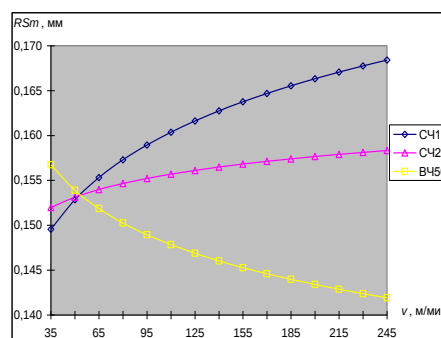
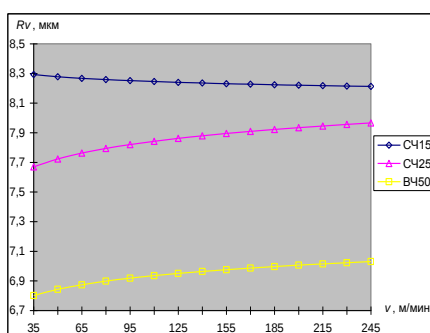
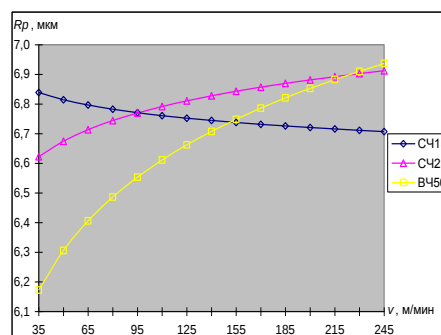
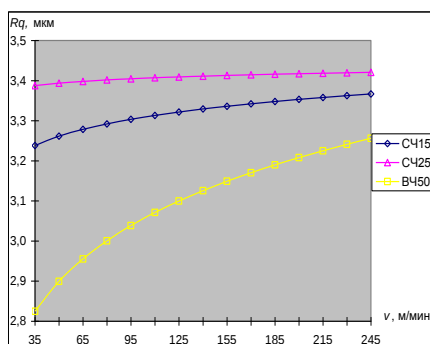
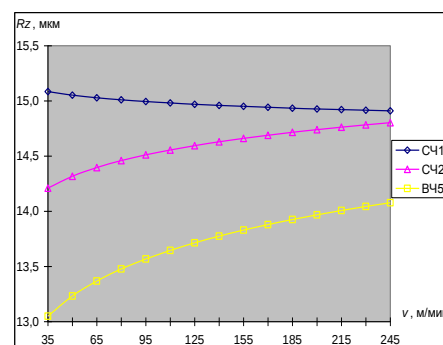
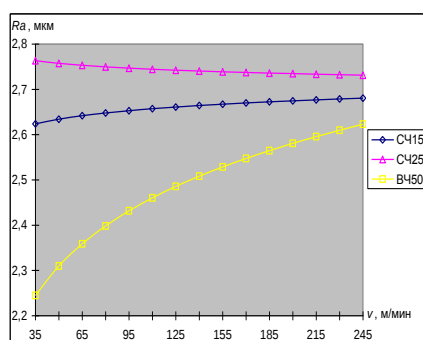


Рис. 4. Влияние скорости резания v на изменение характеристик геометрической структуры поверхности

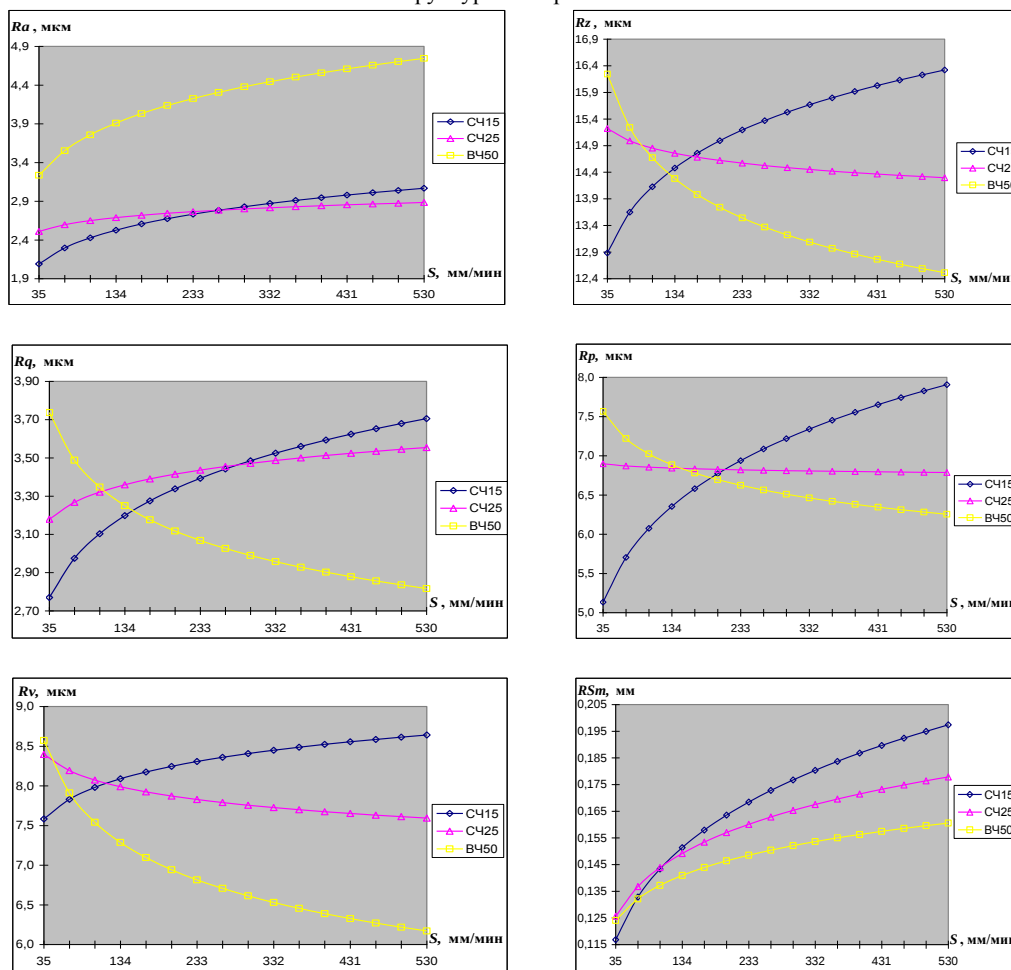


Рис. 5. Влияние подачи S на изменение характеристик геометрической структуры поверхности

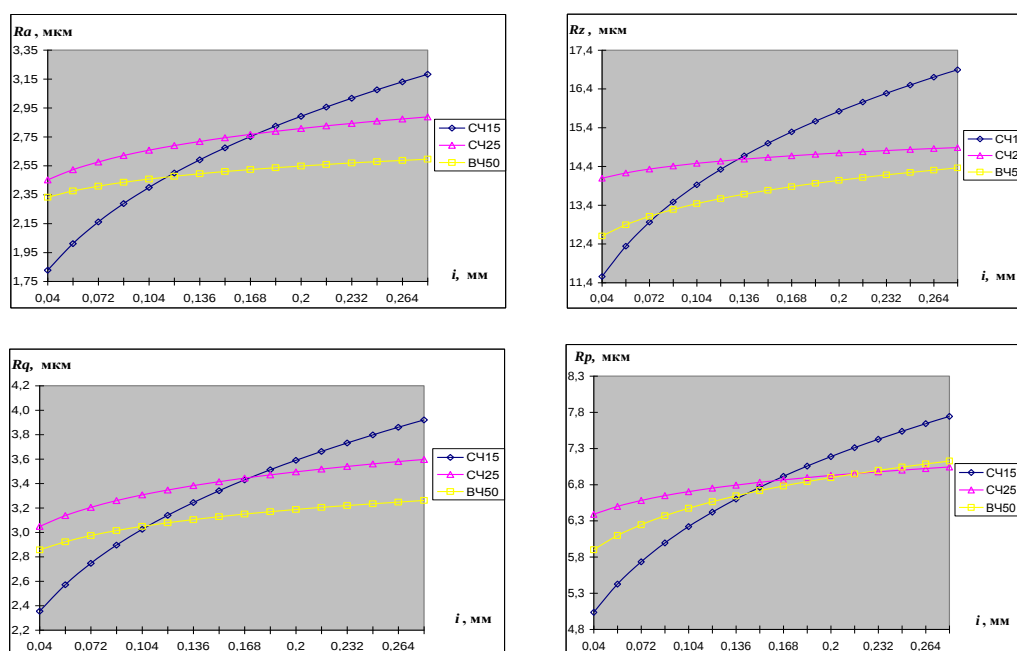


Рис. 6. Влияние натяга i на изменение характеристик геометрической структуры поверхности

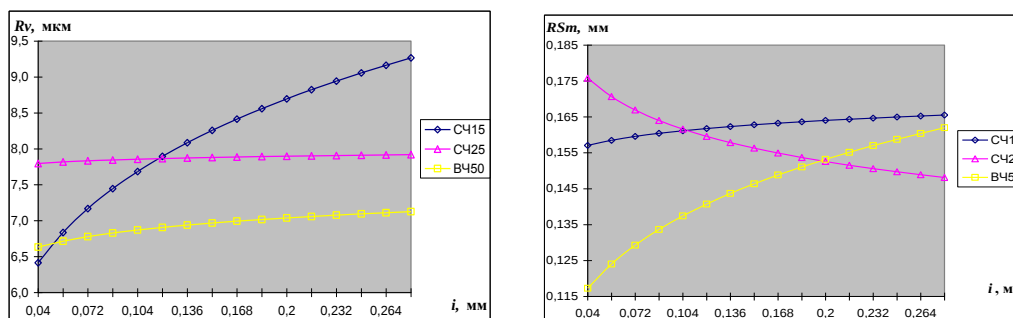


Рис. 6. Окончание (начало см. на с. 36)

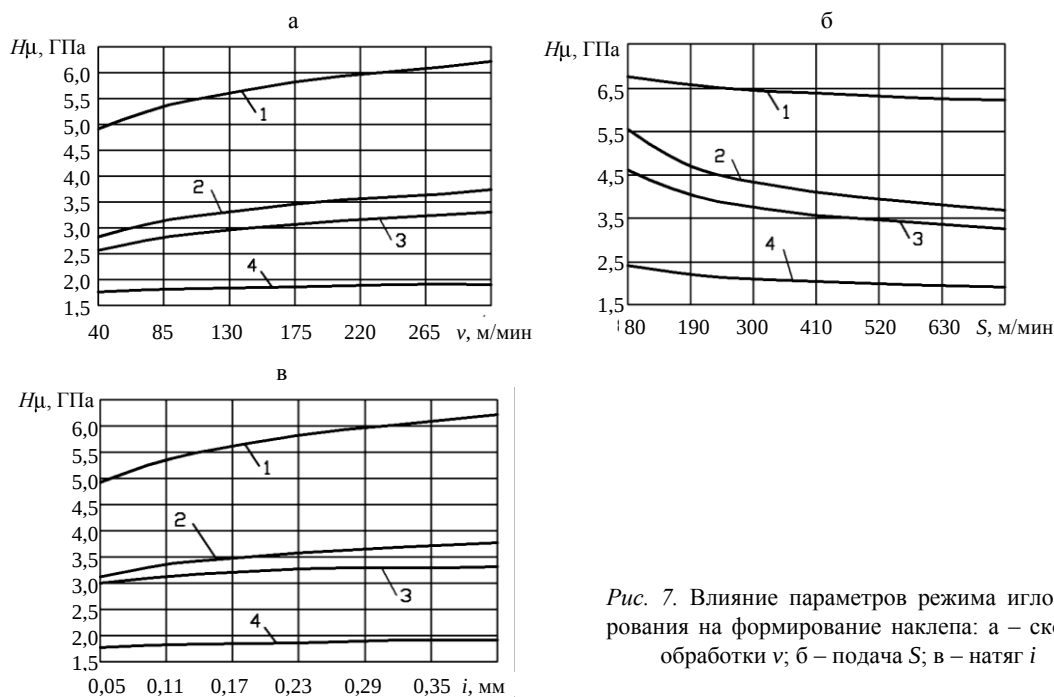


Рис. 7. Влияние параметров режима иглофрезерования на формирование наклепа: а – скорость обработки v ; б – подача S ; в – натяг i

ВЫВОД

Разработанные модели позволят осуществить прогнозирование и управление процессом иглофрезерования для обеспечения требуемой геометрической структурой и микротвердости поверхности деталей из чугуна в зависимости от их эксплуатационного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

2. Перепичка, Е. В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками / Е. В. Перепичка. – М.: Машиностроение, 1989. – 136 с.

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

4. 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.

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

Поступила 02.02.2009