

И. Л. Баршай, д-р техн. наук, профессор, БНТУ; А. В. Бирич, магистр, БНТУ;
С. П. Гончаров, инженер, РУП «МТЗ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНА

The mathematical models that were received as a result of the conducted research allow controlling the quality of the surface of cast-iron work pieces changing cutting modes. In this article results of modeling of influence of needle milling on formation of the wide nomenclature of the parameters describing geometrical structure of a surface of preparations from various marks cast-iron are stated. The developed models will allow carrying out forecasting, management and optimization of process of needle milling for maintenance of required geometrical structure of details from cast-iron depending on conditions of their operation.

Введение. Обеспечение качества поверхностей изделий всегда является особой заботой разработчиков, так как качество изделий в большинстве случаев определяется свойствами поверхностей используемых материалов, к которым предъявляются различные эксплуатационные требования. Так, например, поверхности деталей должны надежно передавать нагрузки, обеспечивать герметичность соединений, обладать устойчивостью к воздействию внешней среды (коррозия, адгезия) и, кроме того, иметь привлекательный внешний вид.

Современные исследования влияния качества поверхностей на сопротивление воздействию окружающей среды выявили решающее значение физико-химического состояния поверхностного слоя в этом процессе, и в частности влияния характеристик геометрической структуры поверхности. Однако какая бы корреляция между геометрической структурой поверхности и ее эксплуатационными свойствами ни рассматривалась, эта корреляция справедлива в большинстве случаев лишь в той мере, в какой изменение характеристик геометрической структуры сопутствует соответствующему изменению физико-химического состояния поверхностного слоя в данном технологическом процессе. Позитивным процессом во всех случаях эксплуатации является повышение степени физико-химической однородности поверхностного слоя [1].

Установлено, что 70...80% вариаций показателей износостойкости связаны с параметрами геометрической структуры поверхности деталей машин [2].

Коррозионная стойкость деталей машин также связана с геометрической структурой поверхности деталей. Известно [3], что 12% вариации коррозии объясняется изменением характеристик геометрической структуры поверхности.

Основная часть. Одним из перспективных методов обработки для формирования качества поверхности и эксплуатационных показателей деталей машин является иглофрезерование.

Расширение области применения иглофрезерования ограничивается недостаточностью данных о влиянии параметров режима обработки на формирование геометрической структуры обработанной поверхности. Это обуславливает актуальность выполнения данных исследований.

Микрорезцами иглофрезы (рисунок) являются проволочные элементы малого диаметра ($d = 0,2 \dots 1,0$ мм) с высокой (40...80%) плотностью упаковки. Материал проволочных элементов – легированные пружинные стали 51ХФА, 60С2А, 65С2ВА и др. Особенность геометрии микрорезцов иглофрезы – незначительный радиус округления режущей кромки, которая в процессе работы самозатачивается. Это обеспечивает при реверсировании вращения работу инструмента без переточек.

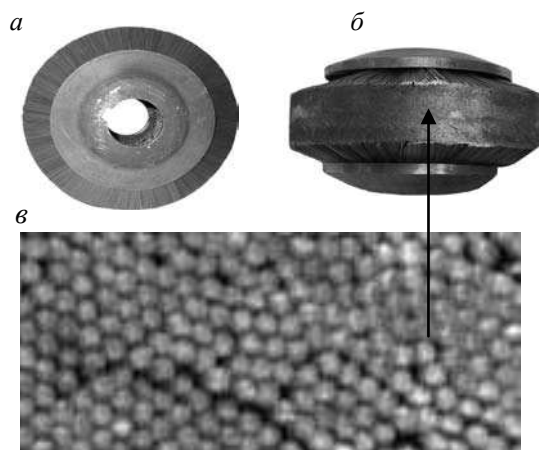


Рисунок. Иглофреза:
а, б – внешний вид; в – вид
на режущую поверхность (X20)

Каждый проволочный элемент – полужесткий микрорезец. При вращении иглофрезы, проволочные элементы режущего контура соприкасаются с обрабатываемой поверхностью и упруго деформируются в тангенциальном направлении. Формируются углы резания. В результате врезания микрорезцов в поверхность обрабатываемой заготовки и перемещения относительно нее происходит снятие слоя металла.

Иглофрезерование в значительной степени подобно процессам фрезерования и шлифования, т. к. 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, а со шлифованием – количество режущих элементов, а в ряде случаев и размеры стружки.

Важное преимущество иглофрез – их высокая долговечность. В производственных условиях их работоспособность доходит до 2000 ч. Особенностью иглофрезерования является возможность последующего использования металлической стружки, составляющей в отдельных случаях до 5% массы обрабатываемой детали. Стружку, например, применяют в порошковой металлургии. Это открывает возможность создания мало- и безотходных процессов изготовления деталей машин в результате применения иглофрезерования.

Виды обработки иглофрезерованием можно подразделить на: зачистные; отделочно-зачистные, формирующие геометрическую структуру, и отделочно-упрочняющие поверхность заготовки.

Глубина обработки, зависящая от параметров процесса, позволяет полностью удалить дефектный слой толщиной 0,2...0,3 мм. Благодаря малому поперечному сечению и значительной податливости проволочных элементов обеспечивается возможность удаления слоя металла равномерной толщины с фасонной поверхности.

При формировании геометрической структуры поверхности иглофрезерование осуществляется в режиме микрорезания в зоне взаимодействия режущих элементов с поверхностью заготовки. Достигаемая высота микронеровностей находится в пределах Ra 100...0,40 мкм и определяется сочетанием технологических факторов.

При иглофрезеровании кроме уменьшения высоты микронеровностей до Ra 0,40 мкм в поверхностном слое формируется наклеп. Степень наклепа иглофрезерованной поверхности составляет 40...45%. Варьирование характеристик конструкции иглофрезы (материал проволочных элементов, их диаметр и свободный вылет), а также параметров режима обработки иглофрезерованием: скорость резания (v , м/мин), подача (S , мм/мин), натяг (i , мм) позволяет управлять формированием качества поверхности, а следовательно, и эксплуатационными показателями обработанной поверхности.

Исследования выполняли на чугунах следующих марок: ВЧ50 (ГОСТ 7293-85), СЧ15, СЧ25 (ГОСТ 1412-85). Из указанных материа-

лов были изготовлены образцы (15×20×10 мм). Обработку плоских поверхностей образцов иглофрезерованием осуществляли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Использовали иглофрезу диаметром $D = 125$ мм, шириной $B = 20$ мм и плотностью набивки проволочных элементов 75...80%. Диаметр единичного проволочного элемента $d = 0,3$ мм, вылет $l = 20$ мм.

Для оценки микрогеометрии поверхности до и после иглофрезерования был использован действующий в настоящее время комплект международных норм, характеризующих геометрическую структуру обработанной поверхности – SO-3274:1997 и ISO 4287:1998. Под этим понятием понимается объединение всех неровностей поверхности. Наиболее часто она анализируется в сечении, перпендикулярном к поверхности. При наличии ярко выраженных следов обработки используется сечение, перпендикулярное таким следам.

Измерение характеристик геометрической структуры поверхности образцов до и после иглофрезерования выполняли на компьютеризованном приборе TR-200.

При проведении экспериментов определяли формирование следующих характеристик геометрической структуры поверхности в зависимости от параметров режима иглофрезерования: среднее арифметическое отклонение профиля Ra , стандартное отклонение профиля Rq , высоту десяти точек отклонений от регулярного профиля Rz , максимальную высоту выступов профиля Rp , максимальную глубину впадин профиля Rv , среднюю высоту элементов профиля RSm , относительную опорную длину профиля на уровне 50% – $Rmr(50)$. Моделирование влияния параметров режима иглофрезерования на изменение характеристик геометрической структуры поверхности осуществляли на основе математического планирования эксперимента, в частности метода ПП_τ – последовательностей [4].

Результаты ранее выполненных исследований [5] позволили определить значения параметров режима иглофрезерования, принятые за основной уровень: скорость $v = 280$ м/мин; минутную подачу $S = 390$ мм/мин и натяг в системе «иглофреза – обрабатываемая поверхность» $i = 0,30$ мм. Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 1.

Реализованные сочетания параметров режима иглофрезерования в соответствии с матрицей планирования приведены в табл. 2.

Предварительный анализ результатов эксперимента свидетельствует о том, что минимальные значения исследуемых высотных характеристик геометрической структуры поверхности для СЧ25 после иглофрезерования получены в четвертом опыте при $v = 210$ м/мин; $S = 98$ мм/мин; $i = 0,22$ мм.

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

Минимальные значения шаговой характеристики RSm были зафиксированы в пятом опыте при обработке на следующих режимах: $v = 105$ м/мин; $S = 35$ мм/мин; $i = 0,19$ мм, максимальные – в четвертом опыте. Минимум значения относительной опорной длины профиля $Rmr(50)$ был получен во втором опыте ($v = 70$ м/мин; $S = 135$ мм/мин; $i = 0,08$ мм); максимум – в пятом ($v = 105$ м/мин; $S = 49$ мм/мин; $i = 0,19$ мм).

Таблица 2

Условия проведения опытов

Номер опыта	X_1 – скорость резания v , м/мин	X_2 – минутная подача $S_{мин.}$, мм/мин	X_3 – натяг i , мм
1	140	195	0,15
2	70	292	0,08
3	210	98	0,22
4	255	244	0,04
5	105	49	0,19
6	175	146	0,11
7	35	341	0,26

Для СЧ15 минимальные значения исследуемых высотных характеристик шероховатости поверхности получены в четвертом опыте при следующих параметрах режима обработки: $v = 255$ м/мин; $S = 244$ мм/мин; $i = 0,04$ мм; максимальные – в первом при $v = 140$ м/мин; $S = 195$ мм/мин; $i = 0,15$ мм. Минимальные значения шаговой характеристики RSm были зафиксированы во втором опыте при обработке на следующих режимах: $v = 70$ м/мин; $S = 292$ мм/мин; $i = 0,08$ мм, максимальные – в третьем опыте. Минимум значения относительной опорной длины профиля $Rmr(50)$ был зафиксирован в третьем опыте ($v = 210$ м/мин; $S = 98$ мм/мин; $i = 0,22$ мм); максимум – в седьмом ($v = 35$ м/мин; $S = 341$ мм/мин; $i = 0,26$ мм).

Для ВЧ50 минимальные значения исследуемых высотных характеристик геометрической структуры поверхности получены в четвертом опыте при следующих параметрах режима обработки: $v = 255$ м/мин; $S = 244$ мм/мин; $i = 0,04$ мм; максимальные в третьем – при $v = 210$ м/мин; $S = 98$ мм/мин; $i = 0,22$ мм. Ми-

нимальные значения шаговой характеристики RSm были зафиксированы в четвертом опыте при обработке на следующих режимах: $v = 255$ м/мин; $S = 244$ мм/мин; $i = 0,04$ мм, максимальные в третьем опыте. Минимум значения относительной опорной длины профиля $Rmr(50)$ на был получен во втором опыте ($v = 70$ м/мин; $S = 292$ мм/мин; $i = 0,08$ мм); максимум – в седьмом ($v = 35$ м/мин; $S = 341$ мм/мин; $i = 0,26$ мм).

После обработки экспериментальных данных для образцов из СЧ15, СЧ25, ВЧ50 были разработаны математические модели влияния параметров режима иглофрезерования на изменения исследуемых характеристик геометрической структуры поверхности в виде уравнений регрессии (1)–(21).

Данные модели позволяют рассчитать значение характеристик геометрической структуры поверхности при выбранном сочетании параметров режима обработки:

СЧ25

$$Ra = 2,53v^{-0,006} S^{0,0151} i^{0,084}; \quad (1)$$

$$Rq = 3,15v^{0,005} S^{0,041} i^{0,085}; \quad (2)$$

$$Rz = 15,7v^{0,021} S^{-0,023} i^{0,028}; \quad (3)$$

$$Rp = 6,95v^{0,022} S^{-0,006} i^{0,05}; \quad (4)$$

$$Rv = 8,83v^{0,0195} S^{-0,037} i^{0,008}; \quad (5)$$

$$RSm = 0,0607v^{0,021} S^{0,128} i^{-0,088}; \quad (6)$$

$$Rmr(50) = 58,5v^{0,063} S^{-0,055} i^{-0,023}; \quad (7)$$

СЧ15

$$Ra = 2,06v^{0,011} S^{0,141} i^{0,285}; \quad (8)$$

$$Rq = 2,82v^{0,02} S^{0,107} i^{0,262}; \quad (9)$$

$$Rz = 14,1v^{-0,006} S^{0,087} i^{0,195}; \quad (10)$$

$$Rp = 4,66v^{-0,01} S^{0,159} i^{0,221}; \quad (11)$$

$$Rv = 9,38v^{-0,005} S^{0,048} i^{0,189}; \quad (12)$$

$$RSm = 0,0458v^{0,061} S^{0,193} i^{0,027}; \quad (13)$$

$$Rmr(50) = 118v^{-0,19} S^{-0,019} i^{-0,106}; \quad (14)$$

ВЧ50

$$Ra = 3,42v^{0,080}S^{-0,114}i^{0,055}; \quad (15)$$

$$Rq = 4,29v^{0,073}S^{-0,104}i^{0,068}; \quad (16)$$

$$Rz = 21,4v^{0,039}S^{-0,096}i^{0,067}; \quad (17)$$

$$Rp = 8,67v^{0,06}S^{-0,07}i^{0,097}; \quad (18)$$

$$Rv = 1,3v^{0,017}S^{-0,121}i^{0,037}; \quad (19)$$

$$RSm = 0,156v^{-0,051}S^{0,095}i^{0,166}; \quad (20)$$

$$Rmr(50) = 116v^{-0,069}S^{-0,114}i^{-0,104}. \quad (21)$$

Анализ представленных зависимостей изменения характеристик геометрической структуры от параметров режимов иглофрезерования свидетельствует о следующем. Рост скорости иглофрезерования способствует повышению высотных Ra , Rz , Rt , Rp , Ry , Rq и шаговой RSm характеристик геометрической структуры для СЧ15, СЧ25 и снижению RSm для ВЧ50. При этом высотные характеристики увеличились в 1,01...1,16, а шаговая – в 1,8...3,5 раза. Минимум значения относительной опорной длины профиля $Rmr(50)$ получен во втором опыте – 50% ($v = 70$ м/мин; $S = 292$ мм/мин; $i = 0,08$ мм). Максимум – 90% в шестом ($v = 175$ м/мин; $S = 146$ мм/мин; $i = 0,11$ мм).

Выявленный характер изменения характеристик геометрической структуры в зависимости от скорости обработки объясняется присущим иглофрезерованию «краевым» эффектом. Этот эффект заключается в следующем. Крайние стороны обработанной поверхности проволоочные элементы (микрорезцы) имеют изгиб в направлении подачи заготовки большой, так как обладают меньшей жесткостью, чем весь пакет проволоочных элементов. В результате они формируют микроцарапины (следы своего движения) на обрабатываемой поверхности. Кроме этого, в связи с увеличением силы резания формируются оптимальные значения углов γ и α . Сочетания параметров режима иглофрезерования, реализованные в ходе эксперимента в соответствии с его планом (см. табл. 1), расположены таким образом, что в четвертом опыте обработка велась с большой подачей ($S = 244$ мм/мин). В этом опыте в связи с ростом подачи сократилось время контакта с проволоочных элементов с обрабатываемой поверхностью и, как следствие, привело к уменьшению исследуемых высотных характеристик шероховатости и увеличению

шаговой. Увеличение натяга i в системе «обрабатываемая поверхность – рабочая поверхность иглофрезы» способствовало росту всех исследуемых характеристик шероховатости. Рост указанного параметра режима обработки приводит к превалирующему влиянию процесса микрорезания и в меньшей степени пластического деформирования обрабатываемой поверхности, вызываемого ударным воздействием проволоочных элементов иглофрезы.

Заключение. В результате иглофрезерования высотные характеристики снизились в 1,1...1,5 раза. Шаговые характеристики возросли в 1,4...1,8 раза. Установлено, что после иглофрезерования параметры геометрической структуры поверхности находятся в следующих пределах: Ra 1,9...3,2 мкм, Rz 11,8...17,3 мкм, Rp 2,5...3,9 мкм, RSm 0,120...0,240 мм. Минимальное значение высотных характеристик геометрической структуры поверхности получено при максимальной скорости и подаче и минимальной величине натяга (4-й опыт). При этом наибольшее влияние на формирование геометрической структуры для СЧ15, СЧ25 оказывает подача, а для ВЧ50 – натяг. Скорость резания оказывает наименьшее влияние для всех исследуемых материалов.

Разработанные модели позволят осуществить прогнозирование и оптимизацию процесса иглофрезерования, а также управление процессом обработки для обеспечения требуемой геометрической структуры поверхности деталей в зависимости от их эксплуатационного назначения.

Литература

1. Луговский, В. В. Управление качеством поверхностей / В. В. Луговский // Мир металлов. – 1999. – № 2 (2).
2. Технологические основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников [и др.]; под общ. ред. К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
3. Кулаков, Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
4. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Выш. шк., 1985. – 286 с.
5. Баршай, И. Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом. – Минск: Технопринт, 2003. – 246 с.