
УДК 621.787.6

В. М. Пашкевич, В. В. Афаневич

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ, ОБЕСПЕЧИВАЕМОЙ ПРИ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

UDC 621.787.6

V. M. Pashkevich, V. V. Afanevich

EMPIRICAL MODEL OF ROUGHNESS PRODUCED DURING INERTIAL IMPACT TREATMENT

Аннотация

Представлены результаты исследования шероховатости поверхности, получаемой при инерционно-импульсном раскатывании после растачивания. Выявлено влияние факторов на формирование шероховатости обработанной поверхности. В качестве обрабатываемой поверхности использован высокопрочный чугун.

Ключевые слова:

поверхностно-пластическое деформирование, инерционно-импульсная обработка, полный факторный эксперимент, экспериментальные исследования, шероховатость поверхности.

Abstract

The paper presents the results of studying the surface roughness obtained by inertial impact rolling after boring. The effect of factors on the formation of roughness of the surface treated has been revealed. High-strength cast iron has been used as the surface subjected to treatment.

Keywords:

surface plastic deformation, inertial impact treatment, complete factorial experiment, experimental studies, surface roughness.

Введение

Шероховатость поверхности оказывает существенное влияние как на эксплуатационные свойства деталей машин, так и на качество подвижных и неподвижных соединений. Шероховатость поверхности влияет на износостойкость от истирания, сопротивление коррозии, прочность, плотность (герметичность) соединений, химическую стойкость, внешний вид и т. д. Поэтому при проектировании деталей машин и механизмов данному фактору уделяется особое внимание.

Исследования шероховатости при инерционно-импульсной обработке

Экспериментальные исследования влияния исходной шероховатости поверхности и режимов обработки (осевой подачи инструмента на один оборот и частоты вращения заготовки) на качество обработанной инерционно-импульсным раскатыванием поверхности проводились с использованием в качестве технологического оборудования для привода инструмента токарно-винторезного станка модели 16К20ПФ1 в описанном далее порядке. Применяемый материал заго-

товки – специальный высокопрочный чугун с механическими характеристиками, близкими к чугуну марки ВЧ60.

В качестве факторов, оказывающих влияние на шероховатость обрабатываемой инерционно-импульсным раскатыванием поверхности, были приняты три параметра, рассмотренные при конечно-элементном моделировании процесса, – исходная шероховатость поверхности, подача инструмента за оборот заготовки и частота вращения заготовки (шпинделя станка), обеспечивающая необходимую скорость деформирующего шара в момент нанесения удара по обрабатываемой поверхности.

На первом технологическом переходе (при предварительной обработке) заготовки с исходным диаметром отверстия $78 \pm 0,2$ мм закреплялись в трехкулачковом патроне и растачивались до формирования диаметра $79,8^{+0,1}$ мм. Далее, на втором технологическом переходе, для обеспечения постоянства баз заготовка без переустановки подвергалась окончательному растачиванию до диаметра $80_{-0,1}$ мм с режимами, позволяющими получить требуемую для заданного матрицей планирования эксперимента исходную шероховатость обработанной поверхности.

Нижнему уровню фактора исходной шероховатости соответствовали поверхности с величиной среднего арифметического отклонения профиля $Ra = 1,984$ мкм (рассеивание измеренных значений – $1,82 \dots 2,26$ мкм), а верхнему уровню – $Ra = 6,413$ мкм (рассеивание $5,83 \dots 7,24$ мкм). Для достижения указанных уровней фактора при использовании выбранного расточного резца с режущей пластиной из твердого сплава экспериментальным путем были определены следующие режимы растачивания: $n = 400$ мин⁻¹, $S_o = 0,05$ мм/об (для $Ra = 1,984$ мкм) и $n = 400$ мин⁻¹, $S_o = 0,2$ мм/об (для $Ra = 6,413$ мкм).

После чистовой токарной обработки производилась оценка полученной исходной шероховатости поверх-

ности. Для измерений использовался портативный компьютерный профилометр-профилограф модели SJ-210 фирмы Mitutoyo. С целью соблюдения принципа постоянства баз перед третьим, отделочным, переходом (инерционно-импульсным раскатыванием) такие измерения проводились без съема заготовки со станка (рис. 1) для обеспечения совпадения осей заготовки и инструмента.

Оценка шероховатости производилась на пяти различных участках обработанной поверхности. Отсутствие промахов при измерениях контролировалось на основе использования критерия Диксона. Среднее значение параметра Ra использовалось в качестве расчетного значения для построения модели.

Кроме оценки параметра шероховатости Ra , производилась запись профилограмм поверхностей.

Для реализации третьего технологического перехода – инерционно-импульсной обработки (ИИО) внутренней поверхности заготовки – для обеспечения заданной осевой подачи инструмента было изготовлено приспособление, осуществляющее жесткую связь суппорта станка и задней бабки, в пиноли которой был установлен раскатчик для инерционно-импульсной обработки (рис. 2).

Таким образом, устанавливая на станке требуемую величину подачи суппорта за оборот заготовки, обеспечивали осевую подачу инструмента.

Исследования проводились по методике полного факторного эксперимента, обеспечивающей все возможные комбинации исходных параметров. При этом выполнялась обработка заготовок с комбинациями следующих режимов, соответствующих верхнему и нижнему уровням факторов:

– частота вращения заготовки $n_{\min} = 630$ мин⁻¹, $n_{\max} = 1000$ мин⁻¹;

– подача инструмента $S_o_{\min} = 0,05$ мм/об; $S_o_{\max} = 0,2$ мм/об.

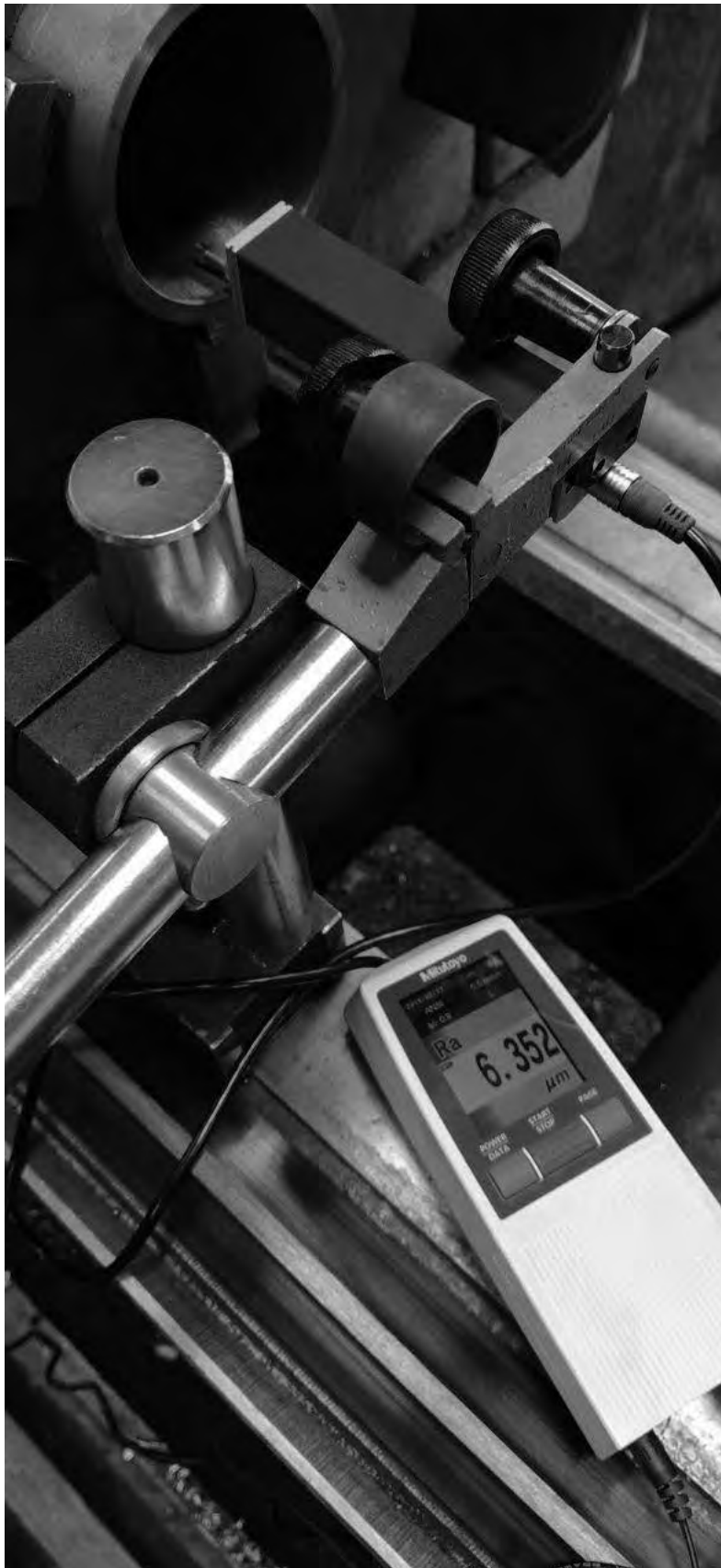


Рис. 1. Измерения исходной шероховатости перед ИИО

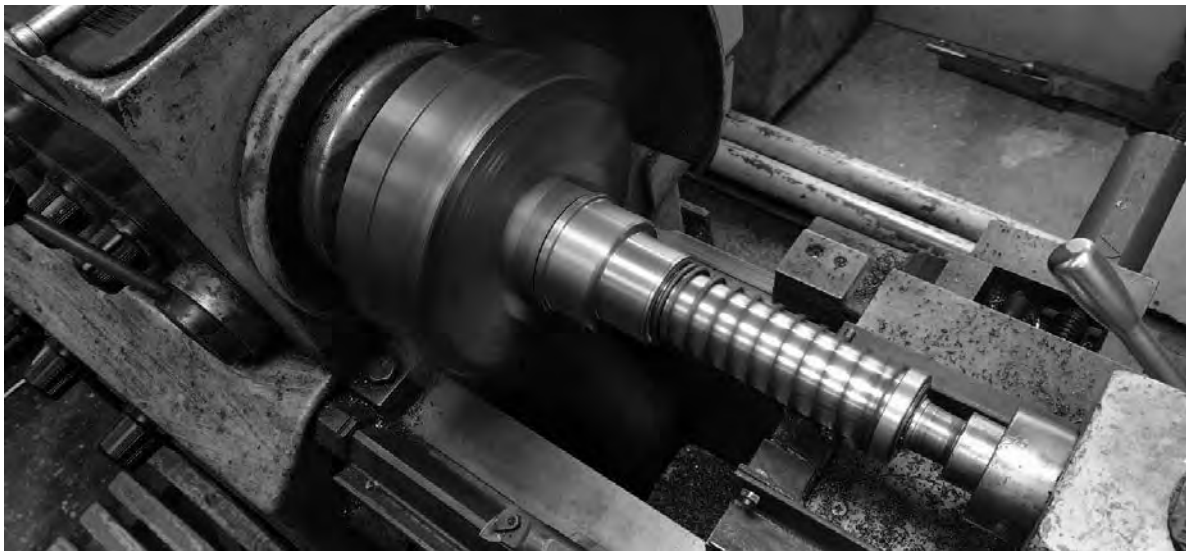
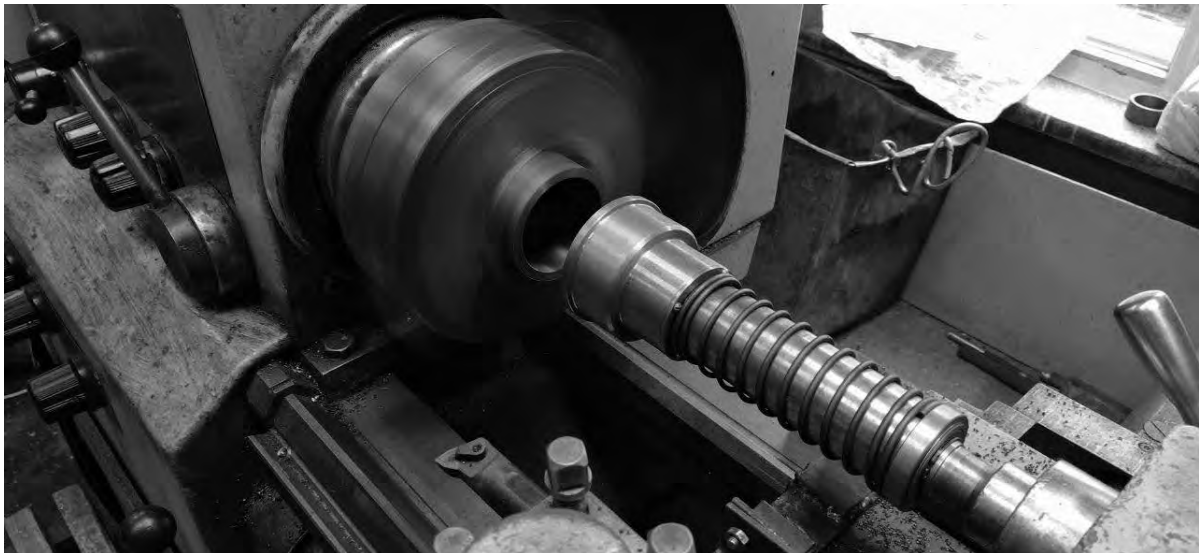


Рис. 2. ИИО заготовки на станке 16К20ПФ1

После инерционно-импульсного раскатывания заготовка снималась со станка, устанавливалась на измерительной плите профилометра-профилографа, затем проводились измерения шероховатости поверхности, сформированной ИИО. Измерения параметра Ra и запись профилограмм велись на пяти различных участках заготовки. Анализ профилограмм исходных заготовок и заготовок, прошедших ИИО, свидетельствует о возможности существенного снижения исходной шероховатости, а также позволяет сделать предварительный вывод о

возможности управления величиной параметра Ra с помощью выбранных факторов – исходной шероховатости, подачи инструмента и частоты вращения заготовки.

Так, на рис. 3 представлены совмещенные профилограммы поверхностей заготовки, полученных после растачивания и инерционно-импульсного раскатывания. Следует отметить, что регулярный профиль после растачивания заметно изменяется и приобретает частично-регулярный характер. Кроме того, существенно снижается величина

исходной шероховатости. При смятии микронеровностей в большей мере сглаживаются их вершины; следы

обработки токарным резцом могут частично сохраняться во впадинах микронеровностей.

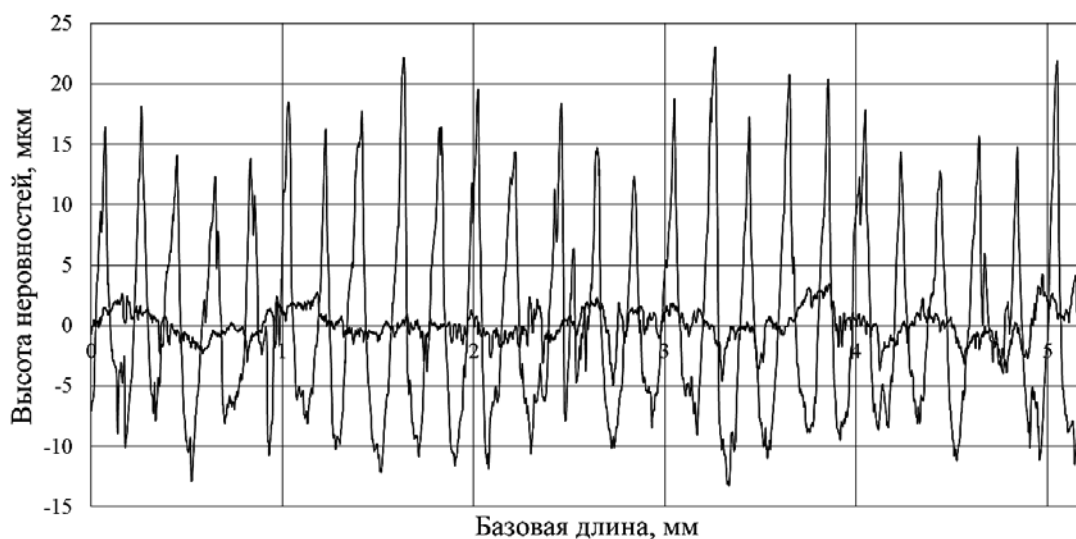


Рис. 3. Совмещенные профилограммы поверхностей заготовки, полученных после чернового точения и инерционно-импульсного раскатывания

Обработка результатов экспериментов

Структура эмпирической модели, построенной с использованием описанной выше методики, представлена на рис. 4. Как отмечалось, в ней в качестве факторов выбраны три параметра:

Ra_i – исходная шероховатость заготовки по параметру Ra , мкм; s – подача инструмента, мм/об; n – частота вращения заготовки (шпинделя станка), мин^{-1} . В качестве переменной отклика модели принята конечная шероховатость поверхности Ra_k , достигнутая в процессе ИИО.

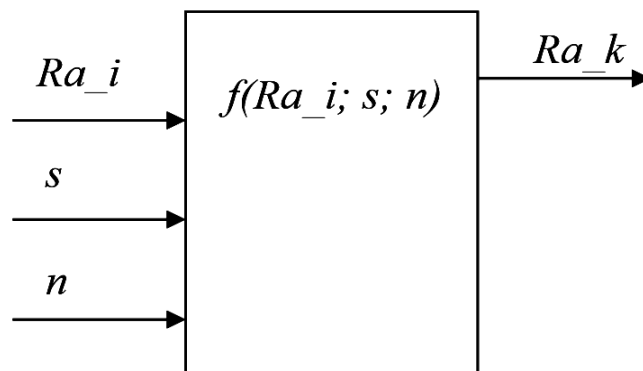


Рис. 4. Структурная схема эмпирической модели шероховатости поверхности при ИИО

В качестве интервалов варьирования факторов выбраны интервалы, совпадающие с интервалами конечно-элементного моделирования процесса ИИО (см. Исследования шероховатости при

инерционно-импульсной обработке).

Результаты полного факторного эксперимента по исследованию шероховатости поверхности после ИИО представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты полного факторного эксперимента

N	z_0	z_1	z_2	z_3	z_{12}	z_{13}	z_{23}	z_{123}	Ra_{k1}	Ra_{k2}	Ra_{k3}	Ra_{k4}	Ra_{k5}	Ra_{sr}
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,31	1,49	1,31	1,39	1,34	1,368
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,75	1,79	1,56	1,64	1,77	1,702
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1,62	1,39	1,45	1,5	1,53	1,498
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	4,24	3,64	3,41	3,64	4,17	3,82
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,93	0,87	0,92	0,96	0,91	0,918
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1,03	0,95	0,93	1,03	1,06	1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1,64	1,47	1,58	1,34	1,31	1,468
8	1	1	1	1	1	1	1	1	3,32	3,2	3,74	4	3,76	3,604

Переменными z_1, z_2, z_3 обозначены нормированные к единичному интервалу значения факторов Ra_i, s, n соответственно. В столбцах $Ra_{k1} \dots Ra_{k5}$ приведены эмпирические данные шероховатости после ИИО в пяти дублирующих экспериментах ($u = 5$). Значение Ra_{sr} – среднее для каждого из восьми уровней ($i = N = 5$).

Модель строилась в полнофакторной форме

$$Ra_k = A_0 + A_1z_1 + A_2z_2 + A_3z_3 + A_{12}z_1z_2 + A_{13}z_1z_3 + A_{23}z_2z_3 + A_{123}z_1z_2z_3. \quad (1)$$

При этом коэффициенты определялись по зависимости

$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{ki} \cdot y_i, \quad (2)$$

где y_i – экспериментальные значения шероховатости, представленные в столбцах $Ra_{k1} \dots Ra_{k5}$ матрицы планирования.

Расчетные значения коэффициентов:

$$A_0 = 1,92225;$$

$$A_1 = 0,60925;$$

$$A_2 = 0,67525;$$

$$A_3 = -0,17475;$$

$$A_{12} = 0,50525;$$

$$A_{13} = -0,05475;$$

$$A_{23} = 0,11325;$$

$$A_{123} = 0,00825.$$

Для оценки их статистической значимости с принятым уровнем значимости $\alpha = 0,05$ рассчитывались дисперсии случайных ошибок по уровням:

$$S_{ou_i} = \sum_1^u (y_{iu} - \bar{y}_i)^2, \quad (3)$$

где \bar{y}_i – средние по уровням эксперимента (Ra_{sr}), $\bar{y}_i = \frac{1}{u} \sum_u y_{iu}$,

а затем общая дисперсия случайных ошибок

$$S_{ou} = \sum_i S_{ou_i} \quad (4)$$

с числом степеней свободы

$$f_{ou} = (u - 1)i. \quad (5)$$

Доверительный интервал коэффициентов оценивался с применением критерия Стьюдента:

$$|A_k| > t_{\alpha; f_{ou}} \cdot S_A, \quad (6)$$

где $t_{\alpha; f_{ou}}$ – критическое значение критерия Стьюдента, найденное для заранее выбранного уровня значимости α и числа степеней свободы f_{ou} ; S_A – дисперсия коэффициентов модели,

$$S_A = \sqrt{\frac{S_{ou}}{f_{ou} \cdot N}}. \quad (7)$$

Рассчитанное значение доверительного интервала оказалось равным 0,1330. Таким образом, статистически незначимыми на уровне $\alpha = 0,05$ оказались соответствующие взаимодействия факторов коэффициенты A_{13} , A_{23} , A_{123} , а модель приняла окончательный вид

$$Ra_k = 1,92225 + 0,60925z_1 + 0,67525z_2 - 0,17475z_3 + 0,50525z_1z_2. \quad (8)$$

Для оценки тесноты связи между факторами модели и переменной откли-

ка предварительно оценивался коэффициент множественной детерминации, а далее – проводилась оценка значимости уравнения множественной регрессии. С этой целью была определена общая дисперсия данных

$$S_o = \sum_i \sum_u (y_{iu} - \bar{y})^2 \quad (9)$$

с числом степеней свободы

$$f_o = iu - 1. \quad (10)$$

Кроме того, была найдена регрессионная дисперсия $S_{рег}$, характеризующая детерминированную вариацию экспериментальных наблюдений:

$$S_{рег} = u \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad (11)$$

где \hat{y}_i – вычисленные по формуле (8) модельные значения для каждого уровня экспериментов.

Генеральное среднее данных \bar{y} определялось по формуле

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{ui} \sum_i \sum_u y_{iu} = \\ &= \frac{1}{i} \sum_i \left[\frac{1}{u} \sum_u y_{iu} \right] = \frac{1}{i} \sum_i \bar{y}_i, \end{aligned} \quad (12)$$

а число степеней свободы $f_{рег}$ регрессионной дисперсии равнялось числу факторов модели ($k = 3$):

$$f_{рег} = k. \quad (13)$$

Коэффициент детерминации для построенной модели (8)

$$r^2 = \frac{S_{рег}}{S_o}. \quad (14)$$

Полученные расчетные значения подтверждают тесную связь переменных модели:

$$S_o = 46,3215;$$

$$f_o = 39;$$

$$S_{рег} = 44,51853;$$

$$f_{рег} = 3;$$

$$r^2 = 0,961.$$

Для оценки статистической значимости уравнения регрессии (8) также проводилась проверка с использованием критерия Фишера на уровне $\alpha = 0,05$.

Остаточная дисперсия $S_{ост}$ и число ее степеней свободы $f_{ост}$ находились по формулам:

$$S_{ост} = S_o - S_{рег}; \quad (15)$$

$$f_{ост} = f_o - f_{рег}. \quad (16)$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{рег}$ сравнивалось с критическим значением квантиля распределения Фишера $F_{\alpha; f_{рег}; f_{ост}}$, зависящего от ранее определенных чисел степеней свободы $f_{рег}$ и $f_{ост}$:

$$F_{рег} = \frac{(S_{рег} / f_{рег})}{(S_{ост} / f_{ост})} > F_{\alpha; f_{ост}; f_{рег}}. \quad (17)$$

$$S_{ост} = 1,802968;$$

$$f_{ост} = 36;$$

$$F_{рег} = 296,30 > 8,60.$$

Так как условие (17) соблюдается, то уравнение множественной регрессии (8) является статистически значимым на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для оценки адекватности модели экспериментальным данным рассчитывалась дисперсия неадекватности и

число ее степеней свободы:

$$S_{ад} = u \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2; \quad (18)$$

$$f_{ад} = i - 1 - k. \quad (19)$$

Модель считается адекватной в том случае, если вносимая ею систематическая погрешность не превышает случайной погрешности данных. Указанный критерий эквивалентен выполнению условия

$$F_{ад} = \frac{(S_{ад} / f_{ад})}{(S_{ош} / f_{ош})} < F_{\alpha; f_{ош}; f_{ад}}. \quad (20)$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{ад}$ сравнивалось с критическим значением квантиля распределения Фишера $F_{\alpha; f_{ош}; f_{ад}}$:

$$S_{ад} = 0,635648;$$

$$f_{ад} = 4;$$

$$F_{ад} = 4,36 < 5,74.$$

Так как условие (20) соблюдается, то модель (8) является адекватной экспериментальным данным на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Выводы и обсуждение результатов

1. Полученные при экспериментальных исследованиях данные, а также построенная модель свидетельствуют о тесной связи шероховатости поверхности после ИИО с тремя влияющими факторами – исходной шероховатостью заготовки, подачей инструмента, частотой вращения заготовки.

В качестве еще одной составляющей определено взаимодействие факторов исходной шероховатости поверхности и подачи инструмента. Вероятно, такое взаимодействие объясняется регулярными характеристиками профиля,

полученного при предварительной токарной обработке (характеристики профиля определяются подачей токарного резца).

2. Для уровня статистической надежности $\alpha = 0,05$ определена статистически значимая эмпирическая зави-

симость (коэффициент детерминации $r^2 = 0,961$), адекватная экспериментальным данным. Этот результат подтверждает возможность управления показателями ИИО на основе эмпирической модели.

Статья сдана в редакцию 29 октября 2020 года

Виктор Михайлович Пашкевич, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

Виталий Викторович Афаневич, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-297-45-38-58. E-mail: vitas-ik@tut.by.

Viktor Mikhailovich Pashkevich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

Vitaly Viktorovich Afanevich, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-297-45-38-58. E-mail: vitas-ik@tut.by.