

УДК 621.923.1, 685.1

DOI 10.18698/0536-1044-2017-4-35-46

Прогнозирование режимов чистового шлифования быстрорежущих пластин переменной податливости при многопараметрической оптимизации шероховатости

Я.И. Солер, Нгуен Ван Кань, Хоанг Нгок Ань

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., 83

Predicting Finishing Grinding Conditions for High-Speed Cutting Plates of Variable Compliance Using Multiparametric Optimization of Roughness

Y.I. Soler, Nguyen Van Canh, Hoang Ngoc Anh

Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83



e-mail: solera@istu.irk.ru, vancanh.vn@mail.ru, hoangngocanhmta@gmail.com



Рассмотрена возможность управления шлифованием сборных пластин из быстрорежущей стали различной жесткости для повышения производительности процесса, снижения трудоемкости и сроков технологической подготовки при обеспечении заданного микрорельефа поверхности. Для повышения эффективности робастного проектирования шлифовальной операции с помощью программы Design-Expert 8.0.4.1 выполнен поиск моделей I многомерного дисперсионного анализа и реализована многопараметрическая оптимизация процесса с учетом служебного назначения инструмента. Получены оптимальные режимы чистового шлифования (наивысшей производительности) сборных инструментов на каждом уровне жесткости. Установлено, что выбор оптимального режима шлифования позволяет повысить производительность процесса для быстрорежущих пластин с продольной переменной жесткостью до 1,7 раза, а с поперечной — 1,3 раза.

Ключевые слова: шлифование быстрорежущих пластин, многопараметрическая оптимизация, программа Design-Expert 8.0.4.1, технологические факторы (параметры), регрессионные модели.



This paper describes the possibility of managing the grinding process of built-up plates made of high-speed steel in order to improve performance, reduce labour intensity and the length of technological preparation, while guaranteeing the specified quality of the microrelief. To increase efficiency of robust design of grinding operations, the authors use Design-Expert 8.0.4.1 software to search for Models I of the multivariate analysis of variance. Multiparametric optimization of the process with regard to the service function of the tool is performed. The optimal grinding conditions for finish grinding (highest efficiency) of built-up tools for each level of rigidity are obtained. It is established that by selecting the optimal grinding conditions, it is possible to increase the efficiency of the process up to 1.7 times for high-speed plates with variable longitudinal rigidity and up to 1.3 times for high-speed plates with variable transversal rigidity.

Keywords: grinding high-speed cutting plates, multiparametric optimization, Design-Expert 8.0.4.1 software, technological factors (parameters), regression models.

На окончательном этапе изготовления режущих инструментов применяют шлифование [1, 2]. В качестве материала для инструментов, имеющих сложный профиль шлифования (сверла, зенкеры, развертки, протяжки и т. д.), используют быстрорежущие стали, обладающие высокими показателями прочности и вязкости [3, 4]. Среди них встречаются маложесткие инструменты, податливостью которых без должного обоснования часто пренебрегают. В связи с этим исследование процесса шлифования пластин из быстрорежущих сталей с учетом переменной жесткости является актуальной проблемой.

Традиционное управление технологическим процессом (ТП) проводят на основе опыта и квалификации инженеров-технологов. В настоящее время предложена новая концепция, известная под названием «метод робастного проектирования» [5–7]. Она исключает значительную часть интуитивных решений и трудоемких натуральных испытаний, необходимых в прошлом при отладке ТП. Робастное проектирование требует тесного взаимодействия специалистов по обеспечению качества и инженеров-производственников. В основу этой концепции положены три этапа: системное проектирование (контроль качества на стадии проектирования ТП); параметрическое проектирование (контроль качества на стадии производства) и проектирование качества. В данном случае акцент обеспечения качества деталей переносится со второго этапа на первый, т. е. на стадию технологической подготовки инструментального производства. Сказанное снижает трудоемкость изготовления быстрорежущих пластин (БП) и повышает их конкурентоспособность в условиях рыночной экономики.

Однако контроль БП на стадии проектирования развит не так полно, как при изготовлении, и требует кардинальной проработки. Системное проектирование следует проводить на основе планируемых экспериментов с варьированием технологических переменных не менее чем на трех уровнях и использовать при этом многомерный дисперсионный анализ с детерминированными факторами (I МДА) для интерпретации наблюдений. Многоуровневая матрица плана эксперимента повышает робастность проектирования ТП и обеспечивает изготовле-

ние деталей требуемого качества с минимальными затратами [5–7].

Цель работы — найти модели I многомерного дисперсионного анализа для БП различной податливости с использованием программы Design-Expert 8.0.4.1 и реализовать многопараметрическую оптимизацию процесса с учетом служебного назначения инструмента.

Методика исследования. Методика исследования состоит из трех этапов: описания условий проведения натурального эксперимента, методики поиска моделей I МДА и оптимизации.

Условия проведения натурального эксперимента. Опыты проводили при следующих неизменных условиях: станок модели 3Г71; круги фирмы Norton (США) формы 01 размерами 200×20×76 мм с характеристикой 5NQ46I6VS3 [8]; объект исследования — образцы из стали марки P9M4K8 (66...68 HRC) размерами $D \times H = 40 \times 40$ мм, закрепленные на приспособлении и шлифуемые по торцу; скорость резания $v_k = 35$ м/с; СОЖ — 5%-ная эмульсия «Аквол-6» (ТУ 0258-024-00148843-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин.

В исследовании рассмотрена оптимизация процесса шлифования БП стали марки P9M4K8 с переменной жесткостью, значение которой, по нашему предположению, должно существенно влиять на качество БП. Для физического моделирования деталей с переменной жесткостью постоянных размеров спроектировано специальное приспособление [9], конструкция которого позволяла изменять его жесткость по длине рамы. При этом податливость приспособления распространялась на всю заготовку. Для ее закрепления в приспособлении была установлена плита с Т-образными пазами и использованы прихваты. При этом погрешность базирования $\Delta_s = 0$.

Переменные процесса шлифования представлены параметрами шероховатости: R_a , R_q , R_z , R_{max} , S_m (ГОСТ 25142–82), которые измерены с помощью системы на базе профилометра-профилографа модели 252 завода «Калибр». В общем виде отклики представлены средними опытными \bar{y}_{qgi} и прогнозируемыми \hat{y}_{qgi} , где индексы qgi в сжатой форме отражают следующую переменную информацию. Индекс $q = 1; 2$ — направление изучаемой шероховато-

Таблица 1

Интервалы варьирования и уровни натуральных и нормированных факторов

Уровни факторов	Факторы				
	s_{np} , М/МИН (А)	s_n , ММ/ДВ. ХОД (В)	t , ММ (С)	z , ММ (D)	j , Н/ММ (Е)
+1,00	15	10	0,0200	0,3	11122,58
0,00	10	6	0,0125	0,2	5680,00
-1,00	5	2	0,0050	0,1	383,26

Примечание. s_{np} — продольная подача; s_n — поперечная подача; t — глубина резания; z — операционный припуск; j — жесткость детали; дв. ход — двойной ход

сти: 1 — в направлении поперечной подачи; 2 — параллельно вектору s_{np} . Направление варьирования жесткости БП определяет индекс $g = 1; 2$: 1 — параллельно поперечной подаче (j_1), 2 — параллельно вектору s_{np} (j_2). Моделирование направления варьирования податливости достигалось поворотом рамы приспособления на 90° . Индексы $i = 1; 3$ отражают разбивку жесткости БП на три подгруппы (табл. 1): $i = 1$ — $E \in [-1; -0,35]$ — мало жесткие; $i = 2$ — $E \in (-0,35; +0,35)$ — средне жесткие; $i = 3$ — $E \in [+0,35; +1]$ — высоко жесткие. В табл. 1 также представлены остальные переменные технологические параметры при шлифовании БП.

Методика поиска моделей I МДА. Системное проектирование ТП для рассматриваемых БП выполнено с помощью D — оптимального плана, приведенного в табл. 2.

Теория поиска моделей с пригонкой по методам наименьших квадратов (НК-оценок) и максимального правдоподобия (МК-оценок) рассмотрена в работах [10–13].

Оптимизация целевых функций в программе Design-Expert 8.0.4.1. Решение экстремальных задач при многофакторном эксперименте чаще всего проводят двумя методами: градиентным и последовательным симплекс-планированием. К сожалению, в теории эксперимента эти методы разработаны для оптимизации одной целевой функции. Это привело к тому, что некоторые исследователи [14, 15] предложили для этих целей использовать комплексный показатель оценки качества деталей. Недостатком такого подхода к оптимизации является то, что в обобщенном показателе выходные параметры процесса представлены в виде произведения степенных функций с постоянными показателями. В реальных условиях возможно перераспределение приоритетов между ними с учетом служебного назначения деталей и условий шлифования. Это нельзя

обеспечить методами, представленными в работах [14, 15]. На наш взгляд, разработку стратегии плоского шлифования деталей различной номенклатуры целесообразнее вести с использованием программы Design-Expert 8.0.4.1, в которой в качестве аналогичного показателя продукции выступает функция толерантности (desirability) [16, 17]

$$d = \left(\prod_{k=1}^w d_k^{\mathfrak{R}} \right)^{1/\sum \mathfrak{R}}, \tag{1}$$

где d — интегральная (полная) функция толерантности для всех целевых функций, участвующих в оптимизации ТП; d_k — дифференциальная функция толерантности k -й целевой функции y_k , $k = \overline{1; w}$; \mathfrak{R} — ранги, увеличение которых усиливает важность обеспечения качества продукции для выбранного показателя, $\mathfrak{R} = \overline{1; 5}$.

В пределе выражение (1) стремится к единице. Для автоматизированного поиска дифференциальных функций d_k необходимо иметь сведения о прогнозируемых средних и наблюдениях. Программа позволяет проводить оптимизацию для каждой ожидаемой средней отклика по целям, которые в полном объеме представлены кусочно-непрерывными функциями: минимум (minimize, рис. 1, а); максимум (maximize, рис. 1, б); заданное значение целевой функции t_k (t — от начальной буквы в слове target, рис. 1, в); диапазон (is in range, рис. 1, г) [18, 19]. На рис. 1 введены следующие параметры: \hat{y}_k — прогнозируемое среднее k -й целевой функции; y_{kmin} и y_{kmax} — наименьшее и наибольшее наблюдения, предсказанные в пространстве U изучаемой целевой функции. Обозначим через n показатель степени функции веса (weight) для k -го параметра качества изделия, физический смысл которого помогают понять кривые 1–3.

Таблица 2

Матрица D — оптимального плана эксперимента

Номер опыта	Фактор					Номер опыта	Фактор				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	1	1	-1	-1	-1	36	1	1	-1	1	0
2	-1	0	1	-1	-1	37	0	1	1	1	0
3	-1	-1	-1	-1	-1	38	0	-1	1	1	0
4	-1	1	1	-1	-1	39	0	0	0	0	0
5	1	-1	1	-1	-1	40	1	-1	0	0	0
6	1	1	-1	-1	-1	41	-1	1	-1	0	0
7	1	1	-1	-1	-1	42	1	-1	1	0	0
8	1	1	0	-1	-1	43	-1	-1	-1	0	0
9	0	0	0	0	-1	44	1	1	-1	0	0
10	-1	1	-1	0	-1	45	1	1	1	0	0
11	1	1	1	0	-1	46	-1	-1	-1	-1	1
12	1	-1	-1	0	-1	47	-1	-1	1	-1	1
13	-1	-1	-1	0	-1	48	-1	-1	1	-1	1
14	1	-1	1	0	-1	49	0	1	1	-1	1
15	-1	-1	1	0	-1	50	0	-1	1	-1	1
16	-1	0	1	0	-1	51	1	1	1	-1	1
17	-1	-1	1	1	-1	52	1	0	-1	-1	1
18	-1	0	-1	1	-1	53	-1	1	-1	-1	1
19	0	-1	-1	1	-1	54	-1	1	1	0	1
20	1	0	1	1	-1	55	1	-1	-1	0	1
21	-1	1	-1	1	-1	56	1	-1	-1	0	1
22	-1	1	1	1	-1	57	1	1	1	0	1
23	0	-1	-1	1	-1	58	1	1	1	0	1
24	1	-1	1	1	-1	59	1	1	0	0	1
25	1	0	-1	-1	0	60	-1	-1	0	0	1
26	0	1	-1	-1	0	61	-1	1	0	0	1
27	-1	0	-1	-1	0	62	-1	1	1	1	1
28	1	-1	0	-1	0	63	1	1	-1	1	1
29	1	-1	-1	-1	0	64	1	-1	1	1	1
30	-1	-1	-1	-1	0	65	-1	-1	-1	1	1
31	1	-1	1	-1	0	66	0	0	0	1	1
32	-1	-1	1	1	0	67	-1	1	-1	1	1
33	1	-1	-1	1	0	68	-1	1	-1	1	1
34	-1	1	1	1	0	69	1	1	-1	1	1
35	-1	-1	0	1	0						

Из рис. 1 следует, что при $n = 1$ (кривая 2) поиск оптимума целевой функции осуществляется в подпространстве $U_1 \subset U$ с использованием линейной регрессии. При снижении n до 0,1 (кривая 1) подпространство U_1 расширяется при одновременном уменьшении интенсивности движения к области абсолютного оптимума, который определяет наибольшее значение $d_k = 1$. В случае выбора $n = 10$ (кривая 3) подпространство U_1 сужается, однако интенсивность движения к оптимуму усиливается. На кривых 1–3, заданных неравенствами $U_1 \subseteq U$, программа просчитывает и предоставляет искомые координаты (\hat{y}_k, d_k) . Для оптимизации «диапазона» (рис. 1, 2) отрезок прямой $\hat{y}_k \in [y_{k\min}; y_{k\max}]$ соответствует $n = 1$. Функцию

«is in range» на практике используют для коррелированных выходных параметров процесса. Например, в данном исследовании к ним относятся шероховатости $(R_q, R_z)_{qg}, R_{a2g}, R_{\max 2g}$, $q = g = 1; 2$, коррелированные со средним арифметическим отклонением неровностей [15]. Тогда при проведении оптимизации целесообразно для параметров R_{a1g} и $R_{\max 1g}$ задать функцию t_k , а для остальных высотных характеристик шероховатости достаточно использовать is in range.

Программа Design-Expert 8.0.4.1 ведет поиск экстремума целевых функций методом симплекс-планирования. Для движения по градиенту автоматически просчитываются координаты вершин симплексов, для чего используют

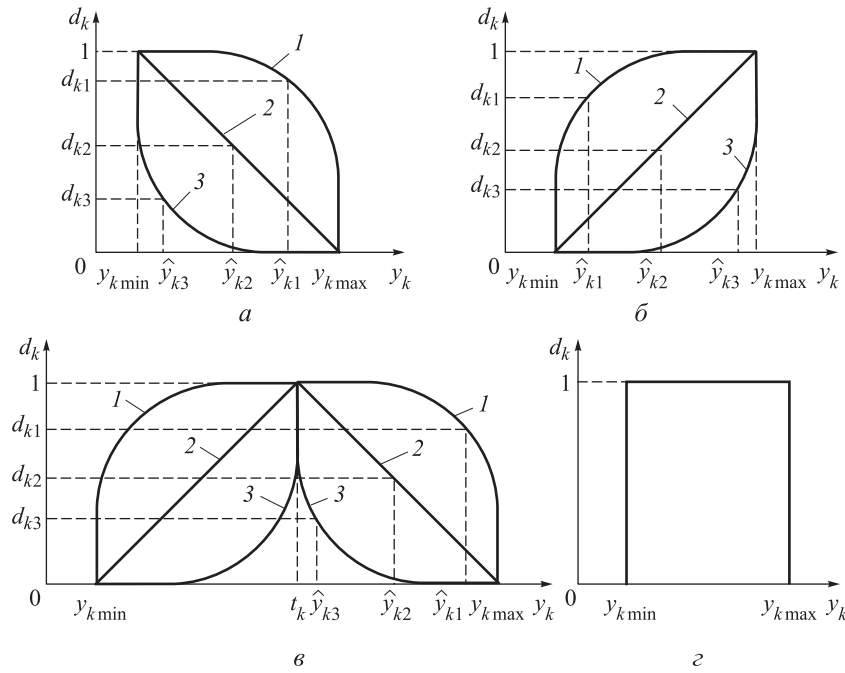


Рис. 1. Графические интерпретации цели оптимизации и функции веса при $n = 0, 1 (1), 1 (2)$ и $10 (3)$

ся модели I МДА. Достоинством выбранной программы является возможность реализации большого количества различных итераций при движении к оптимуму. Это обеспечивается варьированием координат исходного симплекса. Количество предлагаемых решений f в отдельных случаях может достигать 200 и более, хотя для выбора наилучшего достаточно ограничить их в пределах 20...40.

Цель оптимизации для каждой целевой функции выбирали с учетом ее влияния на эксплуатационные свойства детали. По мнению А.Г. Сулова [15], снижение высот микронеровностей R_a, R_z и их среднего шага в обоих направлениях повышает износостойкость поверхности, герметичность соединений и прочность посадок. При ударных и знакопеременных нагрузках особое внимание следует уделять параметру R_{max} , поскольку инструменты должны обладать высокой усталостной прочностью. Для оценки эффективности проведенной оптимизации удобно использовать гистограммы [18], на которых программа просчитывает и представляет интегральные d и дифференциальные d_k функции толерантности. Если пользователя не устраивают на гистограмме результаты поиска оптимума для какой-либо целевой функции, то для нее следует пересмотреть начальные условия оптимизации.

В рамках одной публикации нельзя продемонстрировать все возможности, предоставля-

емые программой по выбору стратегии шлифования. В связи с этим пришлось ограничиться решением нескольких частных задач, которые не рассматривались ранее [4, 6], но имеют практическую значимость.

Для удобства обсуждения результатов робастного проектирования имеет смысл использовать код *gibf*, в который включены дополнительные индексы *bf*, связанные с условиями оптимизации:

b — варианты задания функции веса и рангов (см. рис. 1), которые содержат девять комбинаций степенной функции *weight*:

$1-n = (1^*; 1^{**}); 2-n = (0, 1^*; 1^{**}); 3-n = (1^*; 0, 1^{**});$
 $4-n = (0, 1^*; 0, 1^{**}); 5-n = (10^*; 10^{**}); 6-n = (1^*; 10^{**});$
 $7-n = (10^*; 1^{**}); 8-n = (0, 1^*; 10^{**}); 9-n = (10^*; 0, 1^{**});$

$\mathfrak{R} = 5$; индекс «*» соответствует $y_{kmin} \leq \hat{y}_k \leq t_k$, а индекс «**» — $\hat{y}_k \leq (t_k, y_{kmax})$;

f — номер предлагаемого решения ($f = \overline{1; 100}$).

Следует иметь в виду, что отклики $\hat{y}_{gibf} = \hat{y}_k$, т. е. индексы *gibf*, раскрывают все особенности получения целевых функций \hat{y}_k при оптимизации шлифовальной операции.

Для процедуры оптимизации шлифования приняты следующие начальные условия:

- факторы $(A, B, C, D, E) \in [-1, 00; +1, 00]$, т. е. могут варьироваться на всем пространстве Q плана;

- выходные параметры R_{a1}, R_{max1} заданы функцией *is target*, так как их необходимо предсказать при оптимизации процесса;

• выходные параметры R_{a2} , $R_{\max 2}$, $(R_q, R_z)_g$, $g = \overline{1; 2}$ представлены функцией is in range, что обусловлено отсутствием сведений об их значениях в конструкторской документации;

• средние шаги $(S_{mq})_g$, $g = \overline{1; 2}$ определяются функцией minimize.

Результаты исследования и их обсуждение. С помощью методов НК- и МП-оценок получе-

ны регрессионные модели $(\hat{R}_{a1}, \hat{R}_{z1}, \hat{R}_{\max 1}, \hat{S}_{m1}, \hat{R}_{a2}, \hat{R}_{z2}, \hat{R}_{\max 2}, \hat{S}_{m2})_g$, $g = \overline{1; 2}$ для БП с поперечной ($g = 1$) и продольной ($g = 2$) переменной жесткостью.

В табл. 3 только для параметров шероховатости \hat{R}_{z21} и \hat{S}_{mq2} , $q = \overline{1; 2}$ модели I МДА получены пригонкой методом НК-оценок. Для всех остальных моделей потребовалось трансформирование исходных регрессий методом

Таблица 3

Регрессионные модели микрорельефа поверхности БП Р9М4К8

Параметр	Регрессии \hat{y} , мкм
<i>При поперечной переменной жесткости E_1</i>	
\hat{R}_{a11}	$\exp(-1,4 + 0,2A + 0,63B + 0,3C - 0,068E_1 + 0,037BC - 0,03BE_1 + 0,06CD - 0,035CE_1 + 0,047DE_1 - 0,24B^2 - 0,11C^2)$
\hat{R}_{z11}	$\exp(-0,089 + 0,23A + 0,57B + 0,29C - 0,054E_1 - 0,031AB - 0,049BE_1 + 0,046CD - 0,028CE_1 + 0,047DE_1 - 0,27B^2 - 0,095C^2)$
$\hat{R}_{\max 11}$	$\exp(0,39 + 0,22A + 0,59B + 0,29C - 0,065E_1 - 0,024AB - 0,04BE_1 + 0,059CD + 0,056DE_1 - 0,26B^2 - 0,1C^2 + 0,048D^2)$
\hat{S}_{m11}	$\exp(4,53 - 0,044A + 0,15B + 0,027C + 0,051D + 0,027AB + 0,041AC + 0,029AE_1 + 0,03CD + 0,057A^2 - 0,068C^2)$
\hat{R}_{a21}	$\exp(-3,3 + 0,19A + 0,28B + 0,18C - 0,039D - 0,12E_1 + 0,031AB + 0,041AC - 0,046AD + 0,035AE_1 + 0,096BC - 0,042BD - 0,04CE_1 - 0,14B^2)$
\hat{R}_{z21}	$0,13 + 0,022A + 0,036B + 0,023C - 0,016E_1 + 0,014AB + 10^{-3}(8,668AC - 6,169AD - 9,507AE_1) + 0,016BC - 10^{-3}(8,613BD - 8,097BE_1) + 0,014A^2 - 0,015B^2$
$\hat{R}_{\max 21}$	$\exp(-1,44 + 0,19A + 0,29B + 0,19C - 0,033D - 0,12E_1 + 0,034AB + 0,036AC - 0,052AD - 0,036AE_1 + 0,089BC - 0,055BD + 0,046DE_1 - 0,16B^2)$
\hat{S}_{m21}	$\exp(4,43 + 0,11B - 0,055AE_1 + 0,055CD - 0,059CE_1 + 0,13AB^2 - 0,096B^2E_1 + 0,12C^2E_1 + 0,11CE_1^2)$
<i>при продольной переменной жесткости E_2</i>	
\hat{R}_{a12}	$(0,53 + 0,068A + 0,14B + 0,076C + 0,011D - 0,011E_2 + 0,015AB + 0,008086AD - 0,008374AE_2 + 0,015BC + 0,011BD - 0,008728BE_2 + 0,019CD - 0,05B^2 - 0,035C^2 + 0,047E_2^2)^2$
\hat{R}_{z12}	$(1,04 + 0,15A + 0,24B + 0,14C - 0,025E_2 + 0,018AB + 0,018AD + 0,016BC + 0,021BD - 0,021BE_2 + 0,034CD - 0,048A^2 - 0,088B^2 - 0,065C^2 + 0,087E_2^2)^2$
$\hat{R}_{\max 12}$	$(1,33 + 0,17A + 0,33B + 0,184C - 0,027E_2 + 0,028AB + 0,02AD + 0,021BC + 0,03BD - 0,024BE_2 + 0,048CD - 0,021CE_2 - 0,057A^2 - 0,1B^2 - 0,087C^2 + 0,12E_2^2)^2$
\hat{S}_{m12}	$93,22 - 6,58A + 12,44B + 7,85D + 5,61AB + 3,22AC - 4,16AD + 3,2BD + 3,35BE_2 + 6,18E_2^2$
\hat{R}_{a22}	$\exp(-2,58 + 0,28A + 0,35B + 0,18C - 0,17E_2 + 0,041AB - 0,068AE_2 + 0,083CD + 0,066DE_2 - 0,16A^2 - 0,23B^2 - 0,12C^2 + 0,16E_2^2)$
\hat{R}_{z22}	$\exp(-1,81 + 0,24A + 0,32B + 0,14C - 0,058E_2 + 0,06AB - 0,045AE_2 + 0,059CD - 0,12A^2 - 0,19B^2 + 0,15E_2^2)$
$\hat{R}_{\max 22}$	$\exp(-1,1 + 0,27A + 0,36B + 0,16C - 0,062E_2 + 0,053AB - 0,057AE_2 + 0,067CD - 0,11A^2 - 0,23B^2 - 0,11C^2 + 0,15E_2^2)$
\hat{S}_{m22}	$103,26 + 18,54A + 13,94B + 6,96C - 6,28E_2 - 5,93AE_2 + 4,22BC + 9,56DE_2 - 0,29A^2 + 11,96E_2^2$

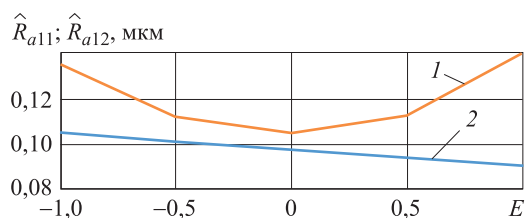


Рис. 2. Влияние направления и значения жесткости БП на шероховатости R_{a11} (1) и R_{a12} (2) при $s_{np} = 7$ м/мин, $s_n = 2$ мм/дв. ход, $t = 0,015$ мм, $z = 0,15$ мм

МП-оценок. Как видно из табл. 3, во всех моделях значимыми оказались операционный припуск и жесткость БП, которые обычно не учитывают при шлифовании.

Наличие моделей I МДА позволило проанализировать влияние направления и значения переменной жесткости БП на шероховатости \hat{R}_{a1g} , $g = 1; 2$ (рис. 2). Установлено, что наибольшие шероховатости \hat{R}_{a12} предсказаны во всем диапазоне варьирования продольной жесткости БП. Однако кривая $R_{a12} = f(j_2)$ имеет минимум при продольной жесткости $j_2 = 5\ 680$ Н/мм. При этом улучшение шероховатости оценивается одной категориальной величиной (КВ) по стандарту [20]. При дальнейшем моделировании роста j_2 ($j_2 \in [5\ 680; 11\ 222,58]$ Н/мм) отмечено увеличение параметра \hat{R}_{a12} в пределах КВ = 0,16 мкм. Для шероховатости R_{max12} кривая зависимости имеет идентичный характер. По всей вероятности, отмеченные закономерности объясняются двумя альтернативными явлениями. При малых жесткостях БП снижение податливости гасит вибрации в процессе шлифования и сопровождается уменьшением высотных шероховатостей. В этом диапазоне жесткостей j_2 деталь выполняет роль своеобразного демпфера. При дальнейшем росте жесткости ($j_2 \in [5\ 680; 11222,58]$ Н/мм) усиливается удар при врезании круга в БП, как и при увеличении глубины резания. При этом отмечается ухудшение топографии поверхности. Последнее предположение подтверждено тем, что при шлифовании образцов, закрепленных на магнитном столе станка, которые рассматривались условно «абсолютно» жесткими, предсказана шероховатость $\hat{R}_{a1} = 0,139$ мкм. Она сопоставима с параметром $\hat{R}_{a12} = 0,14$ для БП высокой жесткости j_2 . Наиболее благоприятным оказалось расположение БП с поперечным варьированием податливости. В данном

Таблица 4

Интервалы варьирования прогнозируемых откликов в факторном пространстве при поперечном и продольном варьировании жесткости БП

Жесткость БП			
$j_1 (E_1)$		$j_2 (E_2)$	
Параметр	$[\hat{y}_{min}; \hat{y}_{max}]_1$, мкм	Параметр	$[\hat{y}_{min}; \hat{y}_{max}]_2$, мкм
\hat{R}_{a11}	[0,045; 0,665]	\hat{R}_{a12}	[0,050; 0,719]
\hat{R}_{z11}	[0,163; 2,236]	\hat{R}_{z12}	[0,186; 2,492]
\hat{R}_{max11}	[0,264; 4,040]	\hat{R}_{max12}	[0,322; 4,075]
\hat{S}_{m11}	[53,45; 167,50]	\hat{S}_{m12}	[56,01; 156,09]
\hat{R}_{a21}	[0,014; 0,122]	\hat{R}_{a22}	[0,014; 0,165]
\hat{R}_{z21}	[0,055; 0,365]	\hat{R}_{z22}	[0,054; 0,418]
\hat{R}_{max21}	[0,083; 0,800]	\hat{R}_{max22}	[0,087; 0,957]
\hat{S}_{m21}	[40,39; 212,43]	\hat{S}_{m22}	[41,13; 212,28]

случае шероховатости оказались меньше своих аналогов при продольном расположении переменной податливости. Сказанное наиболее значимо проявилось для высокожестких БП (фактор $E \in [+0,35; +1]$). В этом диапазоне жесткостей эффект снижения \hat{R}_{a11} достиг двух КВ.

Множество прогнозируемых откликов для параметров шероховатости во всем пространстве представлено в табл. 4.

Оптимизация процесса проведена для чистового этапа шлифования БП с пониженной поперечной жесткостью и кодом «g, 1, 8, f», $g = 1; 2$. Первоначально заданы $\hat{R}_{a11} \in (0,04; 0,05]$ мкм и $\hat{R}_{max11} \in (0,32; 0,40]$ мкм, которые соответственно принадлежат КВ для $\hat{R}_{a11} = 0,05$ мкм и для $\hat{R}_{max11} = 0,4$ мкм. Для этих начальных условий решения f не были получены. Тогда была поставлена задача найти технологические условия шлифования, обеспечивающие целевые функции is target параметры $\hat{R}_{a11} = 0,063$ и $\hat{R}_{max11} = 0,4$ мкм, которые для \hat{R}_{a11} на одну КВ стали больше, чем в предыдущей оптимизации шлифовальной операции. Из полученных решений были выбраны три: $f = 8; 19; 34$ (табл. 5).

Как видно из табл. 5, по выходным параметрам качества поверхности БП все три решения равноценны по КВ. Однако решение $f = 34$ достигнуто при съеме наименьшего припуска, что повышает производительность шлифования. Для этого решения получена сравнительно низкая интегральная функция толерантности

Таблица 5

**Результаты оптимизации микрогеометрии поверхности мало жестких БП
в поперечном переменном направлении**

<i>gibf</i>	Технологические факторы (параметры)					<i>d</i> по (1)			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i> ₁				
1, 1, 8, 8	-0,343 (8,3 м/мин)	-0,981 (2,1 мм/дв. ход)	-1 (0,005 мм)	1 (0,3 мм)	-1 (383,284 Н/мм)	0,523			
1, 1, 8, 19	-0,416 (7,9 м/мин)	-0,981 (2,1 мм/дв. ход)	-1 (0,005 мм)	0,818 (0,282 мм)	-0,426 (3491,482 Н/мм)	0,471			
1, 1, 18, 34	-0,847 (5,8 м/мин)	-1 (2,0 мм/дв. ход)	-0,937 (0,0055 мм)	0,45 (0,245 мм)	-1 (383,261 Н/мм)	0,443			
Прогнозируемые отклики, мкм									
	\hat{R}_{a11}	\hat{R}_{z11}	\hat{R}_{max11}	\hat{S}_{m11}	\hat{R}_{a21}	\hat{R}_{z21}	\hat{R}_{max21}	\hat{S}_{m21}	
1, 1, 8, 8	0,061 (0,063)	0,223 (0,25)	0,384 (0,4)	78,03 (80)	0,023 (0,025)	0,086 (0,1)	0,148 (0,16)	55,32 (63)	0,523
1, 1, 8, 19	0,063 (0,063)	0,233 (0,25)	0,388 (0,4)	78,34 (80)	0,022 (0,025)	0,083 (0,1)	0,142 (0,16)	64,06 (80)	0,471
1, 1, 18, 34	(0,059) (0,063)	0,208 (0,25)	0,352 (0,4)	86,22 (125)	0,022 (0,025)	0,084 (0,1)	0,138 (0,16)	53,24 (63)	0,443

Примечание. В скобках указаны КВ по стандарту [20].

$d_k = 0,4430$ (см. табл. 5). Из рис. 3 следует, что этому способствовали небольшие дифференциальные функции по средним шагам, особенно в поперечном направлении. В частности, $d(S_{m11}) = 0,0338$ (рис. 3). Для ее повышения при оптимизации лучше было назначить функцию is in range, а не minimize.

Рассмотрим оптимизацию микрорельефа БП с продольной переменной жесткостью

($g = 2$). Из табл. 4 видно, что \hat{R}_{a12} варьируется в пространстве $U_1 \in [0,050; 0,719]$ мкм, а \hat{R}_{max12} принадлежат множеству $U_2 \in [0,32; 4,719]$ мкм. Начальные условия оптимизации сохраняем прежними, как и для БП с поперечной переменной жесткостью: is target для $\hat{R}_{a12} = 0,063$ и $\hat{R}_{max12} = 0,4$; is in range для \hat{R}_{z12} , \hat{R}_{z22} , \hat{R}_{a22} , \hat{R}_{max22} ; minimize для \hat{S}_{m12} , \hat{S}_{m22} с кодами «2, $i, 8, f$ », $i = 1; 3$. В качестве полученных

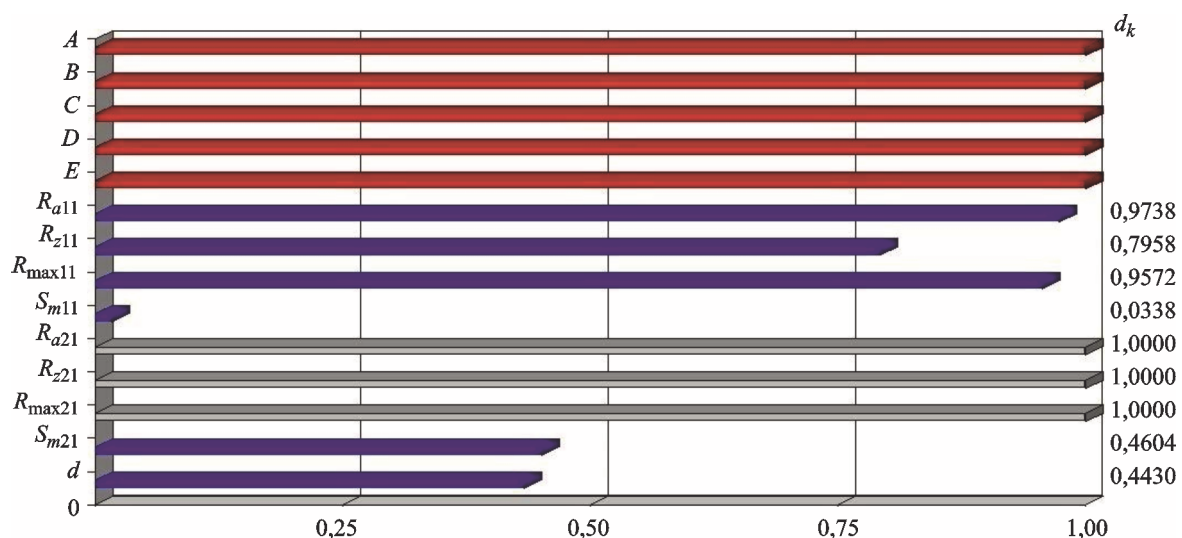


Рис. 3. Интегральная d и дифференциальные d_k функции толерантности для условий оптимизации (1,1,8,34)

Таблица 6

Результаты оптимизации микрогеометрии поверхности при шлифовании БП с продольной переменной податливостью

gibf	Технологические факторы (параметры)					d по (1)			
	A	B	C	D	E				
2,1,8,3	-0,986 (5,07 м/мин)	-0,980 (2,08 мм/дв. ход)	-0,844 (0,0062 мм)	-1 (0,1 мм)	0,429 (8126,63 Н/мм)	0,444			
2,2,8,5	-0,995 (5,02 м/мин)	-1 (2 мм/дв. ход)	-0,701 (0,0072 мм)	-1 (0,1 мм)	0,156 (6649,28 Н/мм)	0,443			
2,3,8,71	-1 (5 м/мин)	-1 (2 мм/дв. ход)	-0,517 (0,0086 мм)	0,031 (0,203 мм)	-0,458 (3322,25 Н/мм)	0,271			
Прогнозируемые отклики, мкм									
	\hat{R}_{a12}	\hat{R}_{z12}	\hat{R}_{max12}	\hat{S}_{m12}	\hat{R}_{a22}	\hat{R}_{z22}	\hat{R}_{max22}	\hat{S}_{m22}	
2,1,8,3	0,062 (0,063)	0,225 (0,25)	0,399 (0,4)	86,52 (125)	0,018 (0,02)	0,074 (0,08)	0,119 (0,125)	41,12 (50)	0,444
2,2,8,5	0,062 (0,063)	0,230 (0,25)	0,40 (0,4)	85,98 (125)	0,018 (0,02)	0,071 (0,08)	0,119 (0,125)	42,67 (50)	0,443
2,3,8,71	(0,063) (0,063)	0,221 (0,25)	0,373 (0,4)	97,74 (125)	0,019 (0,02)	0,071 (0,08)	0,123 (0,125)	48,26 (50)	0,271

Примечание. В скобках указаны КВ по стандарту [20].

решений f приняты те, которые удовлетворяют условиям: $\hat{R}_{a12} \in (0,050; 0,063]$ и $\hat{R}_{max12} \in (0,32; 0,40]$ мкм. Для указанных начальных условий программа предсказала 20 решений: 1 — для БП малой жесткости, 13 — для БП средней жесткости и 6 — для БП высокой жесткости. На каждом уровне жесткости выбрано наилучшее решение с точки зрения максимальной производительности: на практике оно обеспечено при повышенной глубине резания и минимальном операционном припуске (табл. 6).

Установлено, что для обеспечения требуемой шероховатости по параметрам \hat{R}_{a12} и \hat{R}_{max12} при переменной жесткости БП, варьируемой в двух взаимно ортогональных направлениях $g = 1; 2$, необходимо снижать факторы A, B и C до -1. Из табл. 6 видно, что решение $f = 5$ имеет преимущества перед другими благодаря большей глубине резания. Если же рассматривать проблему оптимизации глобально, то каждый параметр j_2 отражает реальную жесткость БП. Для этих условий шлифования каждое из приведенных решений является наилучшим.

Выводы

1. Для снижения высоты микронеровностей следует совмещать наиболее податливые

участки шлифования с вектором поперечной подачи.

2. Проведена многокритериальная оптимизация процесса шлифования с учетом служебного назначения и жесткости БП.

3. Реализована возможность автоматического управления процессом плоского шлифования сборных инструментов из быстрорежущих сталей с учетом конструктивных и технологических требований при использовании робастного проектирования.

4. В качестве основной цели робастного проектирования была выбрана функция is target для параметров \hat{R}_{a11} , \hat{R}_{a12} , \hat{R}_{max11} и \hat{R}_{max12} , регламентирующих состояние микрорельефа деталей. Отсутствие в конструкторской документации четких требований к остальным параметрам микрорельефа БП привело к необходимости определить их поведение в процессе оптимизации функцией is in range.

5. Получены оптимальные технологические параметры шлифования БП при заданном микрорельефе поверхности. Установлено, что выбор оптимального режима шлифования позволяет повысить производительность процесса до 1,7 раза для БП с продольной переменной жесткостью ($g = 2$) и в 1,3 раза — с поперечной ($g = 1$).

Литература

- [1] Рябцев С.А. *Разработка абразивного инструмента с повышенной структурностью и управляемой пористостью для высокопроизводительного шлифования фасонных поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Москва, 2011. 44 с.
- [2] Пилинский А.В. Инновационные методы и вызовы в скоростном и ультраскоростном шлифовании. *Вектор науки ТГУ*, 2015, № 2(32–2), с. 136–143.
- [3] Киреев В.П. Упрочнение быстрорежущей стали динамическим микролегированием и его влияние на износостойкость режущего инструмента. *Изв. Самарского научного центра Российской академии наук*, 2015, т. 17, № 6(2), с. 414–418.
- [4] Богодухов С.И., Козик Е.С. *Материаловедение*. Москва, Инновационное машиностроение, 2015. 504 с.
- [5] Леон Р., Шумейкер А., Какар Р., Кац Л., Фадке М., Тагути Г., Спини Д., Грико М., Лин К., Назарет У., Клиггер У., Нэйр В., Дехнад К., Прегибон Д. *Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути*. Москва, СЕЙФИ, 2002. 384 с.
- [6] Sandgren E., Cameron T.M. Robust design optimization of structures through consideration of variation. *Computers and Structures*, 2002, vol. 80, no. 20–21, pp. 1605–1613.
- [7] Das I. Robustness optimization for constrained, nonlinear programming problems. *Journal Engineering Optimization*, 2000, vol. 32, no. 5, pp. 585–618.
- [8] *Abrasive Technological Excellence*. Norton Saint-Gobain, 2012. 569 p.
- [9] Солер Я.И., Гайсин С.Н., Казимиров Д.Ю. Статистические модели микрогеометрии поверхности при плоском шлифовании абразивными высокопористыми кругами деталей переменной жесткости из стали 12X18H10T. *Металлообработка*, 2005, № 3(27), с. 12–16.
- [10] Soler Ya.I., Lgalov V.V. Predicting the surface microrelief of press-mold components in abrasive grinding. *Russian Engineering Research*, 2013, vol. 33, no. 4, pp. 229–235.
- [11] Dasthagiri B., Venu gopal Goud Dr.E. Optimization Studies on Surface Grinding Process parameters. *International Journal of Innovative Research in Science. Engineering and Technology*, 2015, vol. 4, is. 7, pp. 6148–6156, doi:10.15680/IJRSET.2015.0407166.
- [12] Myers R.H., Montgomery D.C. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New York, Wiley, 2002. 824 p.
- [13] Нгуен В.К., Солер Я.И. Привлечение Design of Experiments для поиска моделей и прогнозирования макрогеометрии поверхности быстрорежущих пластин при различных режимах шлифования. *Вестник Иркутского гос. техн. университета*, 2016, №12(119), с. 60–71.
- [14] Безъязычный, В.Ф. Прокопьев М.А. Вопросы оптимизации плоского шлифования по параметрам качества поверхностного слоя высоконагруженных деталей из жаропрочных сплавов. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2008, № S8, с. 2–4.
- [15] Суслов А.Г. Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В., Бишутин С.Г., Говоров И.В., Горленко А.О., Горленко О.А., Петрешин Д.И., Сакало В.И., Сьянов С.Ю., Тихомиров В.П., Федонин О.Н., Федоров В.П., Финатов Д.Н., Щербаков А.Н. *Инженерия поверхности деталей*. Москва, Машиностроение, 2008. 320 с.
- [16] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009. 704 p.
- [17] Montgomery I.D. *Design and analysis of experiment*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2012. 752 p.
- [18] Солер Я.И. Стрелков А.Б. Робастное проектирование нитридоборового шлифования плоских деталей различной податливости из стали 13X15H4AM3. *Технология машиностроения*, 2010, № 5, с. 5–14.
- [19] Солер Я.И., Стрелков А.Б., Репей Е.О. Робастное проектирование шлифования плоских деталей различной податливости высокопористыми инструментами. *Вестник ИрГТУ*, 2016, № 1(108), с. 16–24.
- [20] ГОСТ 2789–73. *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики*. Москва, Стандартинформ, 2005. 7 с.

References

- [1] Riabtsev S.A. *Razrabotka abrazivnogo instrumenta s povyshennoi strukturnost'iu i upravliaemoi poristost'iu dlia vysokoproizvoditel'nogo shlifovaniia fazonnykh poverkhnostei detalei iz trudnoobrabatyvaemykh materialov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of abrasive tools with high structure and controllable porosity for high-performance grinding of contoured surfaces of parts from hard materials. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2011. 44 p.
- [2] Pilinskii A.V. Innovatsionnye metody i vyzovy v skorostnom i ul'traskorostnom shlifovanii [Innovative methods and challenges in high speed and ultra-high-speed grinding]. *Vektor nauki TGU* [Vector of science TSU]. 2015, no. 2(32–2), pp. 136–144.
- [3] Kireev V.P. Uprochnenie bystrorezhushchei stali dinamicheskim mikrolegirovaniem i ego vliianie na iznosostoičnost' rezhushchego instrumenta [Hardening of high speed steel by dynamic microalloying and its effect on wear resistance of cutting tool]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2015, vol. 17, no. 6(2), pp. 414–418.
- [4] Bogodukhov S.I., Kozik E.S. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie publ., 2015. 504 p.
- [5] Leon R., Shumeiker A., Kakar R., Kats L., Fadke M., Taguti G., Spini D., Griko M., Lin K., Nazaret U., Klinger U., Neir V., Dekhnad K., Pregibon D. *Upravlenie kachestvom. Robastnoe proektirovanie. Metod Taguti* [The management of quality. Robust design. Taguchi Method]. Moscow, SEIFI publ., 2002. 384 p.
- [6] Sandgren E., Cameron T.M. Robust design optimization of structures through consideration of variation. *Computers and Structures*, 2002, vol. 80, no. 20–21, pp. 1605–1613.
- [7] Das I. Robustness optimization for constrained nonlinear programming problems. *Engineering Optimization*, 2000, vol. 32, is. 5, pp. 585–618.
- [8] *Abrasive Technological Excellence*. Norton Saint-Gobain, 2012. 569 p.
- [9] Soler Ya.I., Gaisin S.N., Kazimirov D.Iu. Statisticheskie modeli mikrogeometrii poverkhnosti pri ploskom shlifovanii abrazivnymi vysokoporistymi krugami detalei peremennoi zhestkosti iz stali 12Kh18N10T [Statistical models microgeometry surface at flat grinding wheel abrasive highly porous mi details variable rigidity of steel 12X18H10T]. *Metall obrabotka* [Metallobrabotka]. 2005, no. 3(27), pp. 12–16.
- [10] Soler Ya.I., Lgalov V.V. Predicting the surface microrelief of press-mold components in abrasive grinding. *Russian Engineering Research*, 2013, vol. 33, no. 4, pp. 229–235.
- [11] Dasthagiri B., Venu gopal Goud Dr.E. Optimization Studies on Surface Grinding Process parameters. *International Journal of Innovative Research in Science. Engineering and Technology*, 2015, vol. 4, is. 7, pp. 6148–6156, doi:10.15680/IJIRSET.2015.0407166.
- [12] Myers R.H., Montgomery D.C. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New York, Wiley, 2002. 824 p.
- [13] Nguyen V.C., Soler Ya.I. Privlechenie Design of Experiments dlia poiska modelei i prognozirovaniia makrogeometrii poverkhnosti bystrorezhushchih plastin pri razlichnyh rezhimah shlifovaniia [Using Design of Experiments for search models and prediction of surface macrogeometry of high-speed cutting plates at flat grinding]. *Vestnik irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 12(119), c. 60–71.
- [14] Bez"iazychnyi, V.F. Prokop'ev M.A. Voprosy optimizatsii ploskogo shlifovaniia po parametram kachestva poverkhnostnogo sloia vysokonagruzhennykh detalei iz zharo-prochnykh splavov [Issues of optimization of surface grinding parameters on the quality of surface layers of highly loaded parts from high-temperature alloys]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An Engineering journal with appendix]. 2008, no. S8, pp. 2–4.
- [15] Suslov A.G. Bez"iazychnyi V.F., Panfilov Iu.V., Bishutin S.G., Govorov I.V., Gorlenko A.O., Gorlenko O.A., Petreshin D.I., Sakalo V.I., S"ianov S.Iu., Tikhomirov V.P., Fedonin O.N., Fedorov V.P., Finatov D.N., Shcherbakov A.N. *Inzheneriia poverkhnosti detalei* [Surface engineering of parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 320 p.
- [16] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009. 704 p.

- [17] Montgomery I.D. *Design and analysis of experiment*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2012. 752 p.
- [18] Soler Ya.I., Strelkov A.B. Robastnoe proektirovanie nitridborovogo shlifovaniia ploskikh detalei razlichnoi podatlivosti iz stali 13Kh15N4AM3 [Robust designing of the boron nitride grinding of the flat components of various compliance from steel 134X15H4AM3]. *Tekhnologiya mashinostroeniia* [Tekhnologiya Mashinostroeniya], 2010, no. 5, pp. 5–14.
- [19] Soler Ya.I., Strelkov A.B., Repei E.O. Robastnoe proektirovanie shlifovaniia ploskikh detalei razlichnoi podatlivosti vysokoporistymi instrumentami [Robust design of different ductility flat part grinding with high porous abrasive tools]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 1(108), pp. 16–24.
- [20] GOST 2789–73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [State Standart 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Standartinform publ., 2005. 7 p.

Статья поступила в редакцию 09.01.2017

Информация об авторах

СОЛЕР Яков Иосифович (Иркутск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

НГУЕН Ван Кань (Иркутск) — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., 83, e-mail: vancanh.vn@mail.ru).

ХОАНГ Нгок Ань (Иркутск) — магистрант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., 83, e-mail: hoangngocanhmta@gmail.com).

Information about the authors

SOLER Yakov Iosifovich (Irkutsk) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

NGUYEN Van Canh (Irkutsk) — Postgraduate, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: vancanh.vn@mail.ru).

HOANG Ngoc Anh (Irkutsk) — Master's Student, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: hoangngocanhmta@gmail.com).