

УДК 621.923.1, 510.62

DOI 10.18698/0536-1044-2016-7-82-93

# Выбор высокопористых нитридборовых кругов по топографии пластин Р9М4К8 при маятниковом шлифовании с применением нечеткой логики

Я.И. Солер, А.И. Шустов, М.Т. Нгуен

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

## The Selection of High-Porous Boron Nitride Wheels Based on Topography of W9Mo4Co8 Plates for Pendulum Grinding Using Fuzzy Logic

Y.I. Soler, A.I. Shustov, M.T. Nguen

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

@ e-mail: solera@istu.irk.ru

**i** Процессу шлифования свойственна нестабильность, которую создает абразивный инструмент. В связи с этим выходные параметры процесса, характеризующие топографию поверхности быстрорежущих пластин Р9М4К8, оценены с использованием статистических методов. Имеющие место отклонения от нормальности распределений привели к тому, что акцент в исследовании сделан на ранговые статистики, характеристиками которых служат медианы и квартильные широты, отражающие соответственно меры положения и рассеяния. Оценка режущей способности кругов одиннадцати наименований с учетом шероховатостей, отклонений от плоскостности и микротвердости реализована моделированием нечеткой логики в среде MATLAB с привлечением пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox. Данная система искусственного интеллекта выявила, что по комплексной оценке топографии поверхности шлифование следует проводить высокопористыми кругами из кубического нитрида бора — ЛКВ50 В126 100 О V К27-КФ40 и СВН30 В126 100 L V К27-КФ40, которые вошли в одну группу по режущей способности с оценкой «очень хорошо».

**Ключевые слова:** шлифование, качество поверхности, медиана, квартильная широта, нечеткая логика, функция желательности.

**i** The grinding process is characterized by instability created by abrasive tools. In view of this, the output parameters of the process that characterizes surface topography of high-speed steel plates W9Mo4Co8 are estimated using statistical methods. The existing deviations from normality of distributions resulted in the emphasis of the study being placed on rank statistics where medians and quartile latitudes reflected measures of position and dispersion, respectively. The cutting ability of 11 types of wheels with regard to roughness, deviation from flatness, and micro hardness is assessed through fuzzy logic modeling in the MATLAB environment with the application of Fuzzy Logic Toolbox extension package. This AI system has shown that based on the complex assessment of surface topography, grinding should be done by high-porous cubic boron nitride wheels such as LKV50 B126

100 O V K27-KF40 and CBN30 B126 100 L V K27-KF40, which are included into one cutting ability group and rated as «very good».

**Keywords:** grinding, surface quality, median, quartile latitude, fuzzy logic, desirability function.

Процесс шлифования обеспечивает получение надежных и долговечных деталей высокого качества, поэтому в большинстве случаев завершает технологический процесс. Так, в инструментальном производстве работоспособность быстрорежущих пластин (БП), доля которых на машиностроительных предприятиях составляет около 70 %, обеспечивается шлифованием их рабочих и базовых поверхностей [1]. БП эффективны при обработке ответственных деталей летательных аппаратов. Основную проблему при шлифовании их рабочих поверхностей представляет высокое содержание легирующих элементов. При использовании традиционных абразивов это приводит к дефектам конечной продукции, к снижению производительности и стабильности процесса в целом. Одним из ключевых решений этой проблемы стало появление на рынке абразивной продукции высокопористых кругов (ВПК) из кубического нитрида бора (КНБ). Его товарные марки: ЛКВ — российский эльбор, СВН — наиболее часто употребляемая зарубежная аббревиатура. Они превосходят круги из традиционных абразивных материалов по ряду характеристик. Во-первых, твердость КНБ в 3–4 раза превышает аналоги электрокорунда и карбида кремния и уступает лишь алмазу. Благодаря этому уменьшается износ зерен из КНБ, а их режущая способность (РС) и стойкость кругов увеличиваются. Во-вторых, КНБ менее подвержен термическому износу: поверхностное окисление его зерен начинается при температуре 1 000...1 200 °С, которая для шлифования является мгновенной. В-третьих, КНБ имеет высокую химическую стойкость ко всем элементам состава сталей, особенно к углероду, исключает адгезионный износ, характерный для алмазных кругов. Все это позволяет интенсифицировать режимы резания, повысить качество и производительность процесса на 65...70 % [2].

Цель работы — выбор характеристик ВПК из КНБ по высотным и шаговым параметрам шероховатости:  $R_a$ ,  $R_{max}$  и  $S_m$  [3], отклонениям от плоскостности  $EFE$  [4] и микротвердости  $HV$ , которые доминируют при оценке топографии

БП. Каждый из параметров представлен мерами положения и рассеяния, которые подлежат минимизации, за исключением меры положения для микротвердости. Ее снижение является следствием усиления теплового источника, оказывающего воздействие на шлифуемую поверхность. При анализе нескольких характеристик качества поверхности (как и в рассматриваемом случае) решение этой проблемы на базе одних статистических методов становится практически невозможным. В связи с этим исследование проведено с привлечением нечеткой логики.

**Методика экспериментального исследования.** Методика включает в себя три последовательно выполняемые процедуры: описание условий реализации натурального эксперимента, интерпретацию наблюдений с привлечением статистических методов и моделирование нечеткой логики.

*Методика натурального эксперимента.* Опыты проводили при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3E711B; круги (ГОСТ Р 53923–2010) формы 1A1 и размером 200×20×76×3 мм; БП из стали P9M4K8 ( $HV_{исх} = 7\ 201$  МПа); схема шлифования — периферией круга без выхаживающих ходов; технологические параметры — скорость абразивного инструмента  $v_k = 28$  м/с, продольная подача  $s_{пр} = 6$  м/мин, поперечная подача  $s_{п} = 4$  мм/двойной ход, глубина резания  $t = 0,01$  мм, операционный припуск  $z = 0,1$  мм; СОЖ — 5%-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845–98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин. Круг опускали на глубину  $t$  в момент, когда стол с БП выходил из контакта с ВПК и смещался в крайнее левое положение относительно оператора. Известно, что шпиндель станка имеет вращение по часовой стрелке. В связи с этим движение продольного стола с БП слева направо на ширине круга, равной подаче  $s_{п}$ , принято рабочим, а обратное — выхаживающим с окончательным формированием топографии поверхности БП в условиях попутного шлифования. Оставшаяся часть круга, находящаяся в контакте с БП, заканчивает выхаживание также при вращении

ВПК в направлении вектора  $s_{пр}$ . Объект исследования — образцы  $D \times L = 40 \times 30$  мм — закрепляли непосредственно на магнитной плите станка и обрабатывали по круглому торцу.

Для сокращения объема информации переменные условия шлифования охарактеризованы кодом  $(i, l)$ , который, в частности, удобен при представлении отклика в виде  $y_{il}$ . Индекс  $i = \overline{1; 7}$  распределен по параметрам качества поверхности. Шероховатость в общем виде характеризуют параметры  $R_{al} = y_{1l}$ ,  $R_{maxl} = y_{2l}$ ,  $S_{ml} = y_{3l}$ , расположенные на поверхности в направлении вектора  $s_n$  и превышающие свои аналоги в ортогональном направлении (по вектору  $s_{пр}$ ), особенно по высотным микронеровностям. В связи с этим их учитывают при оптимизации качества поверхности. Отклонения от плоскостности оценивают тремя показателями [4]: основным  $EFE_{maxl} = EFE_{al} = y_{4l}$  и двумя вспомогательными — средним арифметическим  $EFE_{al} = EFE_{5l} = y_{5l}$  и средним квадратичным  $EFE_{ql} = EFE_{6l} = y_{6l}$ . Для микротвердости  $HV_l$  принято обозначение  $y_{7l}$ . Индекс  $l = \overline{1; 11}$  отражает характеристики ВПК из КНБ: 1 — СBN30 В76 100 О V К27-КФ40; 2 — СBN30 В107 100 О V С10-КФ40; 3 — СBN30 В107 100 О V К27-КФ40; 4 — СBN30 В126 100 L V К27-КФ25; 5 — СBN30 В126 100 L V К27-КФ40; 6 — СBN30 В126 100 M V К27-КФ40; 7 — СBN30 В126 100 О V К27-КФ40; 8 — СBN30 В151 100 О V К27-КФ40; 9 — ЛKB50 В107 100 О V К27-КФ40; 10 — ЛKB50 В126 100 M О V К27-КФ40; 11 — ЛKB50 В126 100 О V К27-КФ40. При этом ВПК  $l = 1, 3, 7, 8$  различаются соответствующей зернистостью В76, В107, В126, В151;  $l = 2, 3$  — соответствующей связкой С10, К27;  $l = 4, 5$  — соответствующими размерами порообразующего агента КФ25, КФ40. В кругах  $l = \overline{5; 7}$  возрастает степень твердости: L (среднемягкая), M (средняя), O (среднетвердая). В ВПК  $l = \overline{9; 11}$  использованы зерна эльбора ЛKB50, которые по сравнению с СBN30 имеют большую прочность. Методика измерения параметров шероховатости, отклонений от плоскостности и микротвердости описана в работах [5–7].

*Методика статистической интерпретации экспериментальных данных.* Особенностью процесса шлифования является то, что абразивные зерна в инструменте имеют произвольную форму, хаотическое расположение в связке, разную высоту в радиальном и осевом направлениях, различное количество активных зерен и режущих кромок на единицу площади

их контакта при врезании в заготовку. Изложенное позволяет рассматривать наблюдения непрерывными случайными величинами (СВ) и оценивать их поведение на базе теоретико-вероятностных подходов. Их реализация предполагает представление экспериментальных данных в виде независимых множеств:

$$\{y_{ilv}\}, i = \overline{1; 7}, l = \overline{1; 11}, v = \overline{1; 30}, \quad (1)$$

где  $v$  — количество параллельных опытов, которое целесообразно проводить с одним и тем же  $n$  (в рассматриваемом случае  $n = 30$ ).

В методах статистики для оценки СВ используют следующие частоты [8–11]:

- меры положения (опорные значения):
  - средние

$$\bar{y}_{il} = y_{il\bullet}; \quad (2)$$

- медианы

$$\tilde{y}_{il}; \quad (3)$$

- меры рассеяния (прецизионность):
  - стандарты отклонений

$$SD_{il}; \quad (4)$$

- размахи

$$R_{il} = (y_{\max} - y_{\min})_{il}; \quad (5)$$

- квартильные широты

$$KШ_{il} = (y_{0,75} - y_{0,25})_{il}. \quad (6)$$

На частотах (2), (4) базируется параметрический метод, а на частотах (3), (5), (6) — ранговые статистики. Принятие нуль-гипотез  $H_0$  относительно однородности дисперсий и нормальности распределений (1) рассмотрено в работе [7]. Для снижения трудоемкости их расчета привлечена программа Statistica 6.1.478.0.

*Методика моделирования нечеткой логики.* Нечеткая логика предназначена для создания математических моделей на базе лингвистических рассуждений, в которых принципиальную роль играют язык и опыт экспертов. В этом смысле нечеткая логика равнозначна теории нечетких множеств, т. е. классов с неточными, размытыми границами. Теория нечетких множеств [12–14] представляет собой обобщение и переосмысление важнейших направлений классической математики. При этом под нечеткими множествами  $A_{il}$  понимают совокупности упорядоченных пар, составленных из элементов  $y_{ilv}$  универсальных множеств  $\{y_{ilv}\}$  и соответствующих степеней принадлежности  $\mu\{y_{ilv}\}$ :

$$A_{il} = \{(y_{ilv}, \mu_A(y_{ilv})); y_{ilv} \in \{y_{ilv}\}\},$$

где  $\mu_A(y_{ilv})$  — характеристические функции, указывающие на степень принадлежности  $y_{ilv}$  к нечетким множествам  $A_{il}$ .

При реализации процесса моделирования нечеткой логики созданы атрибуты, базирующиеся одновременно на мерах положения и рассеяния, что невозможно для статистических методов. Созданные атрибуты проанализированы в среде *MATLAB*, в которой использован специальный пакет расширения *Fuzzy Logic Toolbox*, имеющий простой и хорошо продуманный интерфейс, позволяющий легко проектировать и диагностировать нечеткие модели [12–14]. Количественная оценка топографии поверхности проведена с помощью функции желательности  $d_{il}$ , предложенной Харрингтоном [15]. Ее построение основано на преобразовании натуральных значений откликов в безразмерную шкалу желательности (предпочтительности). Назначение функции желательности — установление соответствия между возможными откликами, характеризующими функционирование исследуемого объекта, и психологическими параметрами. В условиях эксперимента это соответствие между полученными показателями качества поверхности БП и их оценками. Реализация нечеткой логики проведена в три последовательно выполняемых этапа: дифференциальные оценки РС ВПК  $l = \overline{1; 11}$  для каждого параметра качества поверхности  $i = \overline{1; 7}$ ; отдельные оценки РС ВПК по всем атрибутам шероховатости ( $i = \overline{1; 3}$ ) и показателей формы ( $i = \overline{4; 6}$ ); интегральные оценки РС ВПК по всем атрибутам выходных параметров и разра-

ботка технологических рекомендаций по маятниковому шлифованию БП Р9М4К8.

**Результаты исследования и их обсуждение.** *Результаты статистической интерпретации множеств (1).* Проверка нормальности распределений множеств (1) проведена по критерию Шапиро — Уилка, по которому нуль-гипотезы  $H_0$  считаются принятыми, если выполняется неравенство  $\alpha_{il} > 0,5$ . Полученные результаты приведены в табл. 1 и в виде гистограмм качества для микротвердостей  $HV_l, l = 2; 3$  с наложенными кривыми нормального распределения на рис. 1.

Как видно из табл. 1, нуль-гипотезы о нормальности распределений приняты в 9 случаях шлифования (подчеркнутые значения) из 77 проанализированных. Из гистограмм микротвердостей следует (см. рис. 1), что при шлифовании БП кругом CBN30 B107 100 O V C10-KФ40 нуль-гипотеза  $H_0$  принята при надежности  $\alpha_{72} = 0,7271$ , а при обработке пластины кругом CBN30 B107 100 O V K27-KФ40  $H_0$  отвергнута при  $\alpha_{73} = 0,0006$ .

Для параметрического метода принятие нуль-гипотезы  $H_0$  относительно однородности дисперсий является наиболее важным требованием к СВ. При этом необходимо учитывать появление ошибок второго рода при принятии неверной гипотезы вследствие вероятностного характера статистических решений. В связи с этим тестирование множеств (1) было выполнено в расширенном объеме по критериям  $m = \overline{1; 3}$ : 1 — Хартли, Кохрена, Бартлетта (в программе представлены одной совокупностью); 2 — Левене; 3 — Брауна — Форсайта. Распреде-

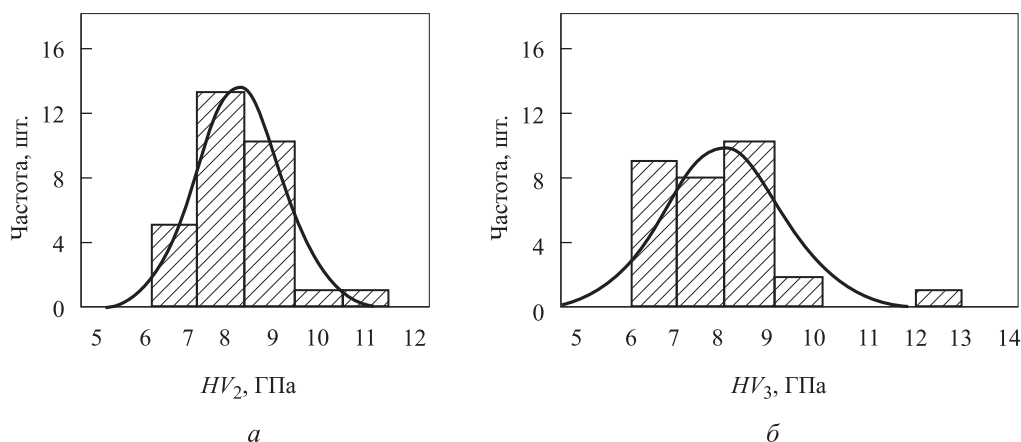


Рис. 1. Гистограммы качества с наложенными кривыми нормального распределения для микротвердостей  $HV_2$  и  $HV_3$  при шлифовании БП Р9М4К8 кругами:  $a$  — CBN30 B107 100 O V C10-KФ40;  $b$  — CBN30 B107 100 O V K27-KФ40

Таблица 1

## Результаты проверки нормальности распределений множеств (1)

Параметр ( $i = \overline{1; 7}$ )	Расчетный уровень значимости $\alpha_{il}$ при переменных $i = \overline{1; 7}$ , $l = \overline{1; 11}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$R_{al}$ (1)	<b>0,8765</b>	<b>0,7191</b>	0,0636	0,4969	0,3827	0,1161	0,4071	0,3996	0,0254	0,1596	0,1387
$R_{max l}$ (2)	0,4645	<b>0,5143</b>	0,2335	0,1544	0,4575	0,1906	0,2027	<b>0,9051</b>	0,0031	0,0292	<b>0,9614</b>
$S_{ml}$ (3)	0,0094	0,2032	0,0022	0,4556	0,1467	0,3116	0,3906	0,0261	<b>0,5481</b>	<b>0,5910</b>	0,0774
$EFE_{max l}$ (4)	0,0021	0,4200	$0,9 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-5}$	$0,3 \cdot 10^{-6}$	0,0014	0,0021	0,0837	0,3510	0,0008	0,0106
$EFE_{al}$ (5)	0,0745	0,0819	$0,6 \cdot 10^{-4}$	0,1016	$0,7 \cdot 10^{-5}$	0,1484	0,2038	0,00007	0,0945	0,0017	0,0092
$EFE_{ql}$ (6)	0,0110	0,2240	$0,5 \cdot 10^{-5}$	0,0006	$0,9 \cdot 10^{-6}$	0,0006	0,0211	0,0005	0,0457	0,0006	0,0738
$HV_l$ (7)	0,1353	<b>0,7271</b>	0,0006	0,4682	0,1353	0,1940	0,0788	0,4682	0,1959	0,2978	<b>0,7745</b>

Таблица 2

## Результаты проверки однородности дисперсий множеств (1)

Параметр ( $i = \overline{1; 7}$ )	Расчетный уровень значимости $\alpha_{mi}$ при $m = \overline{1; 3}$			Принятие $H_0$
	1	2	3	
$R_{al}$ (1)	0	0	0	+
$R_{max l}$ (2)	0	0	0	+
$S_{ml}$ (3)	0	0,02	0,06	+*
$EFE_{max l}$ (4)	0	0	0,004	+
$EFE_{al}$ (5)	0	0,0004	0,04	+
$EFE_{ql}$ (6)	0	0	0,009	+
$HV_l$ (7)	0	0	0	+

ления множеств (1) характеризуются гомогенными дисперсиями (принятием  $H_{0mil}$ ), если по каждому критерию для параметров качества  $i = \overline{1; 7}$  выполняются неравенства  $\alpha_{mi} < 0,05$ , где 0,05 — ошибка принятия  $H_0$  по каждому  $m$  и  $i$ . Общее решение в пользу гомогенности дисперсий рассматривается при условии  $f_0 \in [2; 3]$ . Как видно из табл. 2, однородность дисперсий для всех параметров качества, за исключением  $S_m$ , удовлетворяет условию  $f_0 = 3$ , а для среднего шага неровностей — условию  $f_0 = 2$  (выделено знаком «\*» в последнем столбце табл. 2).

Для повышения надежности принятия статистических решений необходимо учитывать нормальность распределений множеств (1). В связи с этим привлечение свободного от указанных ограничений рангового метода статистики с его одномерными распределениями частот (3), (6) оказалось наиболее приемлемым. При моделировании в среде *MATLAB* экспериментальные данные после их статистической

интерпретации принято рассматривать входными переменными:  $\tilde{y}_{il}$ ,  $KШ_{il}$ ,  $i = \overline{1; 7}$ ,  $l = \overline{1; 11}$  (табл. 3).

Режущую способность ВПК  $l = \overline{1; 11}$  оценим через регламентированные величины. Параметры топографии поверхности варьируются в следующих интервалах, мкм:  $R_{al} \in [0,19 (0,20); 0,43 (0,50)]$ ,  $R_{max l} \in [1,18 (1,60); 2,58 (3,2)]$ ,  $S_{ml} \in [55,84 (63); 78,59 (80)]$ ,  $EFE_{max l} \in [11,00 (TFE6); 19,50 (TFE8)]$ ,  $EFE_{al} \in [7,63 (TFE6); 10,88 (TFE7)]$ ,  $EFE_{ql} \in [8,04 (TFE6); 11,75 (TFE7)]$ . В скобках указаны категориальные величины (KB) [16] для шероховатостей и качества точности [17] для отклонений от плоскостности. Таким образом, характеристики ВПК могут изменять шероховатости на 2–4 KB, а отклонения от плоскостности — на два *TFE*. Это позволяет снизить трудоемкость шлифования на 1–2 этапа обработки (технологических перехода) при удачном выборе характеристики ВПК. Следует отметить, что во всех случаях шлифования по-

Таблица 3

Характеристики топографии БП

ВПК $\overline{l = 1; 11}$	Параметр ( $i = \overline{1; 7}$ )													
	$R_{al}$ (1)		$R_{maxl}$ (2)		$S_{ml}$ (3)		$EFE_{maxl}$ (4)		$EFE_{al}$ (5)		$EFE_{ql}$ (6)		$HV_l$ (7)	
	$\tilde{y}_{1l}$	КШ <sub>1l</sub>	$\tilde{y}_{2l}$	КШ <sub>2l</sub>	$\tilde{y}_{3l}$	КШ <sub>3l</sub>	$\tilde{y}_{4l}$	КШ <sub>4l</sub>	$\tilde{y}_{5l}$	КШ <sub>5l</sub>	$\tilde{y}_{6l}$	КШ <sub>6l</sub>	$\tilde{y}_{7l}$	КШ <sub>7l</sub>
МКМ												МПа		
1	0,37	0,06	2,22	0,45	77,75	19,00	17,00	13,00	9,88	3,83	10,81	6,03	10732,15	3002,35
2	0,19	0,05	1,18	0,28	56,03	15,38	16,00	4,00	9,71	3,00	11,06	2,76	7804,38	1312,07
3	0,36	0,05	2,20	0,51	68,07	28,79	15,00	6,00	9,00	5,66	9,34	5,37	7804,38	1381,93
4	0,43	0,08	2,55	0,62	72,00	20,79	13,50	5,00	7,63	1,25	8,73	1,58	11267,43	1815,90
5	0,28	0,04	1,71	0,30	78,59	13,66	11,50	4,00	7,92	2,92	8,16	2,78	11446,95	1953,10
6	0,36	0,12	2,23	0,62	72,73	28,2	13,50	6,00	8,04	2,92	8,54	3,00	10131,25	1822,42
7	0,24	0,04	1,45	0,32	65,20	23,91	15,00	9,00	9,92	4,17	10,48	5,35	8830,33	790,05
8	0,41	0,08	2,58	0,48	77,30	21,88	19,00	6,00	10,88	2,25	11,75	2,26	10291,40	1849,45
9	0,33	0,13	1,98	0,79	60,40	25,15	16,00	6,00	7,88	4,34	9,42	4,14	8439,35	1507,27
10	0,35	0,09	1,99	0,58	73,96	20,84	19,50	11,00	9,50	4,50	11,41	6,28	8319,06	1488,13
11	0,25	0,03	1,48	0,19	55,84	14,23	11,00	3,00	7,83	1,33	8,04	1,84	9292,50	1268,90

верхностей микротвердость БП остается выше исходной. Степень наклепа поверхностей варьируется в интервале  $\Delta HV \in [8,38; 58,96]$  % [17]. Лидирующие позиции по наклепу заняли ВПК  $l = 4; 5$ , показавшие упрочнение БП, равное 56,47...58,96 %. Наименьшее упрочнение  $\Delta HV = 8,38$  % получено при шлифовании ВПК  $l = 2; 3$ .

Статистические методы не позволяют дать комплексную оценку качества поверхности БП, когда микро- и макрогеометрию оценивают тремя параметрами качества, причем каждый из них дополнительно представлен мерами положения и рассеяния. Это относится и к микротвердости. Статистические методы в общем случае могут предсказать лидирующие позиции ВПК по мерам положения или прецизионности формирования одного конкретного параметра качества БП.

Так, наименьшие опорные значения для высотных параметров шероховатости  $R_{al}$ ,  $R_{maxl}$  показал ВПК СВН30 В107 100 О V С10-КФ40 ( $l = 2$ ), а по среднему шагу  $S_{ml}$  — ЛКВ50 В126 100 О V К27-КФ40 ( $l = 11$ ). По отклонениям от плоскостности наименьшие медианы параметров  $EFE_{maxl}$  и  $EFE_{ql}$  обеспечил ВПК ЛКВ50 В126 100 О V К27-КФ40 ( $l = 11$ ), а параметра  $EFE_{al}$  — СВН30 В126 100 L V К27-КФ25 ( $l = 4$ ). Наибольшие значения микротвердости поверхности показали ВПК

$l = 4; 5$ . По прецизионности процесса формирования параметров  $i = \overline{1; 4}$  наименьшие КШ<sub>il</sub> обеспечил также ВПК  $l = 11$ . Наибольшую стабильность по параметрам  $i = \overline{5; 6}$  ( $EFE_{al}$  и  $EFE_{ql}$ ) показал ВПК  $l = 4$ , а по микротвердости —  $l = 7$ .

Как видно, возникла ситуация, затрудняющая выбор характеристики ВПК статистическим методом. Для решения этой проблемы привлечен метод нечеткой логики, позволяющий создать экспертную систему классификации кругов по всем исследуемым параметрам. На вход модели подаются атрибуты  $i = \overline{1; 7}$  для различных ВПК  $l = \overline{1; 11}$ , а выходом модели служат оценки качества поверхности — значения функций желательности. Полученные на первом этапе моделирования результаты приведены в табл. 4.

Увеличение функции  $d_{il}$  соответствует повышению работоспособности ВПК  $l = \overline{1; 11}$  по переменным моделирования  $i = \overline{1; 7}$ . Результаты, приведенные в табл. 4, перераспределили приоритеты между исследуемыми ВПК. Последнее особенно важно для тех случаев, когда для одних и тех же ВПК имеют место разноплановые оценки (3) и (6): наименьшее опорное значение и наибольшая мера рассеяния или наоборот. Результаты первого этапа моделирования представляют локальный интерес. В частности, если по служебным требованиям к

Таблица 4

## Результаты первого этапа нечеткого моделирования

ВПК $l = \overline{1;11}$	Функция желательности $d_{il}$						
	Параметры ( $i = \overline{1;7}$ )						
	$R_{al}$ (1)	$R_{maxl}$ (2)	$S_{ml}$ (3)	$EFE_{maxl}$ (4)	$EFE_{al}$ (5)	$EFE_{ql}$ (6)	$HV_l$ (7)
1	0,4495	0,3934	0,2222	0,1664	0,4580	0,1728	0,4619
2	0,8281	0,8358	0,8386	0,8199	0,4900	0,4702	0,4258
3	0,6023	0,4119	0,1616	0,5573	0,4489	0,3442	0,3811
4	0,1584	0,1753	0,2745	0,6816	0,8416	0,8312	0,8644
5	0,8178	0,7190	0,5000	0,8399	0,8036	0,8207	0,8644
6	0,1981	0,3823	0,1633	0,5805	0,7627	0,7723	0,5101
7	0,8019	0,6927	0,4592	0,4954	0,4489	0,3026	0,6413
8	0,1684	0,1584	0,1584	0,3174	0,4059	0,4736	0,5286
9	0,1590	0,1587	0,4946	0,5573	0,6879	0,5197	0,3359
10	0,4684	0,4779	0,1672	0,1723	0,4059	0,1639	0,3245
11	0,8161	0,8252	0,8416	0,8416	0,8405	0,8413	0,6416

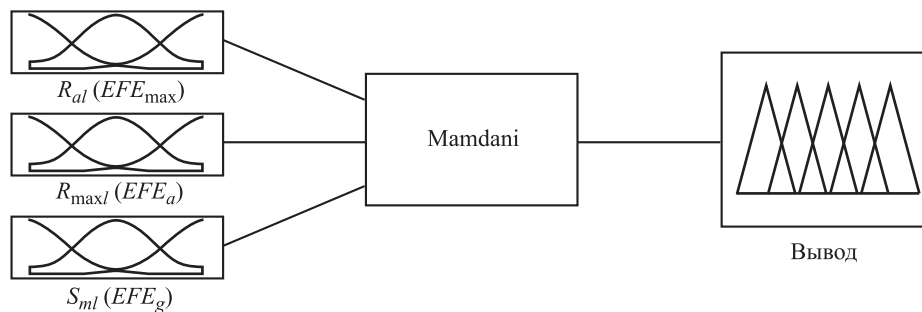


Рис. 2. Система комплексной оценки параметров качества БП по двум группам шероховатостей и отклонений от плоскостности с применением алгоритма нечеткого вывода Mamdani

Таблица 5

## Числовые диапазоны переменной входа

Вид оценки	Параметр входа		
Лингвистическая	Плохой	Нормальный	Хороший
Числовая	[0,1; 0,5]	[0,1; 0,5; 0,5; 0,9]	[0,5; 0,9]

изготовлению детали следует выдержать один конкретный показатель качества поверхности, то необходимо обеспечить требование только по максимальному отклонению от плоскостности и т. п. Из табл. 4 следует, что по параметру  $EFE_{maxl}$  наилучшими РС обладают ВПК  $l = 11$  ( $d_{4,11} = 0,8416$ ) и  $l = 5$  ( $d_{4,5} = 0,8399$ ).

Задача второго этапа моделирования — оценка топографии БП по двум комплексам атрибутов:  $i = 1; 3$  и  $i = 4; 6$ . В этом случае модель содержит четыре переменных: три входные и одну выходную (рис. 2).

Значение каждой переменной входа представлено числовым диапазоном [0; 1] (табл. 5), а вывод разбит на пять классов (табл. 6, рис. 3). Из анализа параметров входа исключена микротвердость, поскольку она представлена одним атрибутом.

Лингвистические и числовые значения выхода приведены на рис. 3 и в табл. 6.

Правила нечетких рассуждений для разработанной системы включают в себя  $N = 3 \times 3 \times 3 = 27$  возможных сочетаний выходных параметров. В табл. 7 приведены нечеткие правила для

системы классификации качества поверхности деталей при шлифовании каждым ВПК. В пакете *Fuzzy Logic Toolbox* присутствует графический интерфейс, который помогает пользователю упростить просмотры правил рассуждений (*Rule Viewer*).

С помощью графического формата выявлены все возможные упрощения, что позволяет предсказать выходную переменную — вывод. Каждое изменение топографии отображается в просмотре правил вывода, соответственно меняя его оценки по совокупности параметров микро рельефа ( $i = 1; 3$ ), макрогеометрии ( $i = 4; 6$ ) и мик-

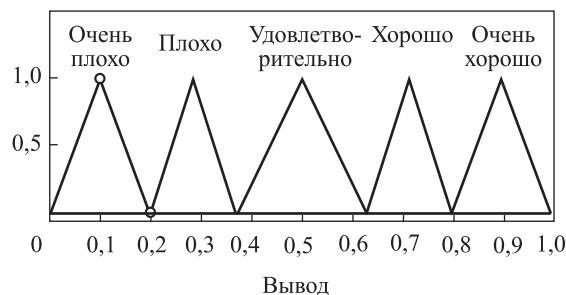


Рис. 3. Функции принадлежности для выходной переменной «Вывод» при решении задачи интегрального поиска ВПК по раздельной оценке шероховатостей ( $i = 1; 3$ ) и отклонений от плоскостности ( $i = 4; 6$ )

Таблица 6

Числовые диапазоны переменной выхода

Вид оценки	Параметр выхода				
Лингвистическая	Очень плохо	Плохо	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо
Числовая	[0; 0,2)	[0,2; 0,37)	[0,37; 0,63)	[0,63; 0,8)	[0,8; 1,0]

Таблица 7

Правила нечетких рассуждений

Вариант	$R_a, EFE_{max}$	$R_{max}, EFE_a$	$S_m, EFE_q$	Вывод
1	Хороший	Хороший	Хороший	Очень хорошо
2	Хороший	Хороший	Нормальный	Очень хорошо
3	Хороший	Хороший	Плохой	Хорошо
4	Хороший	Нормальный	Хороший	Очень хорошо
5	Хороший	Нормальный	Нормальный	Хорошо
6	Хороший	Нормальный	Плохой	Удовлетворительно
7	Хороший	Плохой	Хороший	Хорошо
8	Хороший	Плохой	Нормальный	Удовлетворительно
9	Хороший	Плохой	Плохой	Плохо
10	Нормальный	Хороший	Хороший	Хорошо
11	Нормальный	Хороший	Нормальный	Хорошо
12	Нормальный	Хороший	Плохой	Удовлетворительно
13	Нормальный	Нормальный	Хороший	Хорошо
14	Нормальный	Нормальный	Нормальный	Удовлетворительно
15	Нормальный	Нормальный	Плохой	Плохо
16	Нормальный	Плохой	Хороший	Удовлетворительно
17	Нормальный	Плохой	Нормальный	Плохо
18	Нормальный	Плохой	Плохой	Очень плохо
19	Плохой	Хороший	Хороший	Хорошо
20	Плохой	Хороший	Нормальный	Удовлетворительно
21	Плохой	Хороший	Плохой	Плохо
22	Плохой	Нормальный	Хороший	Удовлетворительно
23	Плохой	Нормальный	Нормальный	Плохо
24	Плохой	Нормальный	Плохой	Очень плохо
25	Плохой	Плохой	Хороший	Плохо
26	Плохой	Плохой	Нормальный	Очень плохо
27	Плохой	Плохой	Плохой	Очень плохо



ротвердости ( $i = 7$ ). Полученные результаты моделирования приведены в табл. 8.

ВПК с одинаковыми лингвистическими оценками будем считать равнозначными по РС, хотя функции  $d_i$  для них различаются незначительно (см. табл. 8). В связи с этим в нормативной документации по шлифованию такие круги следует указывать как рекомендуемые. Результаты второго этапа моделирования свидетельствуют о том, что оценки «очень хорошо» получили следующие ВПК: по шероховатостям — СBN30 B107 100 O V C10-КФ40 ( $l = 2$ ), ЛКВ50 B126 100 O V K27-КФ40 ( $l = 11$ ); по отклонениям от плоскостности — СBN30 B126 100 L V K27-КФ40 ( $l = 5$ ), ЛКВ50 B126 100 O V K27-КФ40 ( $l = 11$ ); по микротвердости — СBN30 B126 100 L V K27-КФ25 ( $l = 4$ ), СBN30 B126 100 L V K27-КФ40 ( $l = 5$ ). При этом следует отметить, что из приведенных инструментов с оценками «очень хорошо» два ВПК попали в две группы показателей качества: ЛКВ50 B126 100 O V K27-КФ40 ( $l = 11$ ) — по параметрам микрогеометрии  $i = 1; 3$  и точности формы ( $i = 4; 6$ ); СBN30 B126 100 L V K27-КФ40 ( $l = 5$ ) — по точности формы и микротвердости ( $i = 7$ ). К БП сборных лезвийных инструментов предъявляются высокие требования по точности формы базовых поверхностей, которые в конечном итоге определяют виброустойчивость и стойкость режущих инструментов в целом. В связи с этим необходимо отметить, что наибольшее повышение точности формы обеспечено при шлифовании ВПК «Аэробор» — ЛКВ50 B126 100 O V K27-КФ40 ( $l = 11$ ), изготовленным полностью по отечественной технологии. Таким

образом, при маятниковом шлифовании быстрорежущих сталей с малыми съемами припуска за проход зерна КНБ повышенной прочности (ЛКВ50) подтвердили свое преимущество перед СBN30 с меньшей прочностью [1].

Третий (завершающий) этап моделирования следует проводить лишь при необходимости оптимизации РС ВПК по всем параметрам качества поверхности  $i = 1; \overline{7}$ . На этом этапе функцию желательности обозначим как  $d_{\bullet\bullet}$ , где дополнительная точка «•» в нижнем индексе характеризует полное осреднение «выхода», т. е. по всем  $i = 1; \overline{7}$  и частично  $l$  для ряда ВПК. Для этого создана модель из четырех переменных: три входные и одна выходная. Значения для каждой переменной входа по функции желательности соответствуют переменным выхода (табл. 9), а лингвистические их величины представлены также пятью классами.

Функции  $d_{\bullet\bullet}$  для выходной переменной «оценка» также представлены пятью классами качества шлифованных БП (см. рис. 3, табл. 6). Правила нечетких рассуждений для разработанной системы остались неизменными (табл. 7). В табл. 9 приведены результаты по влиянию характеристики ВПК на комплексную оценку качества поверхности БП из быстрорежущей стали P9M4K8. Оценка «очень хорошо» для РС ВПК получена при шлифовании ВПК  $l = 5, 11$ . Данные инструменты подтвердили статус рекомендуемых со второй стадии моделирования (см. табл. 8). Первым среди лидеров по интегральной оценке является ВПК  $l = 11$  (ЛКВ50 B126 O V K27 100 КФ40) —  $d_{\bullet\bullet 11} = 0,8567$ . Результаты многопараметрической оптимизации

Таблица 8

Результаты второго этапа нечеткого моделирования

ВПК $l = 1; 11$	Шероховатость		Точность формы		Микротвердость	
	$d_i = \overline{1; 3}$	Вывод	$d_i = \overline{4; 6}$	Вывод	$d_7$	Вывод
1	0,4133	Удовлетворительно	0,3063	Плохо	0,4619	Удовлетворительно
2	0,8424	Очень хорошо	0,6717	Хорошо	0,4258	Удовлетворительно
3	0,4656	Удовлетворительно	0,1825	Очень плохо	0,3811	Удовлетворительно
4	0,1525	Очень плохо	0,7818	Хорошо	0,8644	Очень хорошо
5	0,7833	Хорошо	0,8381	Очень хорошо	0,8644	Очень хорошо
6	0,2883	Плохо	0,6563	Хорошо	0,5101	Удовлетворительно
7	0,7562	Хорошо	0,4745	Удовлетворительно	0,6413	Хорошо
8	0,1473	Очень плохо	0,3894	Удовлетворительно	0,5286	Удовлетворительно
9	0,1476	Очень плохо	0,5917	Удовлетворительно	0,3359	Плохо
10	0,4933	Удовлетворительно	0,2821	Плохо	0,3245	Плохо
11	0,8265	Очень хорошо	0,8524	Очень хорошо	0,6416	Хорошо

Таблица 9

## Результаты завершающего этапа нечеткого моделирования

ВПК ( $l = \overline{1; 11}$ )	$d_{..}$	Вывод
CBN30 B76 100 O V K27-КФ40 (1)	0,2601	Плохо
CBN30 B107 100 O V C10-КФ40 (2)	0,7438	Хорошо
CBN30 B107 100 O V K27-КФ40 (3)	0,2747	Плохо
CBN30 B126 100 L V K27-КФ25 (4)	0,6361	Хорошо
CBN30 B126 100 L V K27-КФ40 (5)	0,8494	Очень хорошо
CBN30 B126 100 M V K27-КФ40 (6)	0,4739	Удовлетворительно
CBN30 B126 100 O V K27-КФ40 (7)	0,6872	Хорошо
CBN30 B151 100 O V K27-КФ40 (8)	0,2601	Плохо
ЛКВ50 B107 100 O V K27-КФ40 (9)	0,2674	Плохо
ЛКВ50 B126 100 M O V K27-КФ40 (10)	0,3165	Плохо
ЛКВ50 B126 100 O V K27-КФ40 (11)	0,8567	Очень хорошо

по РС ВПК важны при робастном проектировании шлифовальных операций, которое желательно выполнять наилучшим (базовым) инструментом. Сказанное обеспечит наиболее полную оптимизацию всех целевых функций процесса.

Интегральные оценки режущей способности ВПК ( $l = \overline{1; 11}$ ) по функции  $d_{..}$  позволили проанализировать роль переменных составляющих в характеристике ВПК и выявить следующее:

– шлифование БП Р9М4К8 целесообразно проводить ВПК с порообразующим агентом КФ40, который имеет оценку «очень хорошо» ( $d_{.5} = 0,8494$ ) по сравнению с КФ25 ( $d_{.4} = 0,6361$ ) при оценке «хорошо»;

– при шлифовании ВПК CBN30 B107 100 O V КФ40 применение связи C10 позволяет заменить лингвистическую оценку «плохо» ( $d_{.3} = 0,2747$ ) на «хорошо» ( $d_{.2} = 0,7438$ ). При этом по результатам второй стадии моделирования установлено, что связка C10 оказывает влияние на уменьшение шероховатости, в то время как по точности формы и микротвердости она получает оценки «хорошо» и «удовлетворительно».

– при шлифовании кругами CBN30 O V 100 K27-КФ40 с зернистостью B76, B107, B126, B151 установлен экстремум функции  $d_{..}$  при B126 ( $d_{.7} = 0,6872$  с оценкой «хорошо»). При этом дальнейший значимый рост качества достигается за счет либо уменьшения твердости ВПК с O до L ( $d_{.5} = 0,8494$ ), либо увеличения прочности зерен КБН с 30 до 50 ( $d_{.11} = 0,8567$ ). В обоих

случаях имеет место наивысшая лингвистическая оценка «очень хорошо».

## Выводы

1. Результаты экспериментальных наблюдений и их статистическая интерпретация показали, что оптимальная характеристика ВПК может обеспечить снижение шероховатостей на 2–4 КВ, а погрешностей формы — на два качества точности. При проектировании операций шлифования это позволяет снизить трудоемкость изготовления деталей путем исключения 2–3 этапов обработки (2–3 переходов).

2. Привлечение нечеткой логики и статистической обработки наблюдений оказалось эффективным инструментом при поиске РС ВПК.

3. Каждый этап нечеткого моделирования позволяет решать различные производственные задачи в зависимости от начальных конструкторских и технологических требований. Так, первый этап предоставляет возможность выбора характеристики ВПК, когда необходимо обеспечить один параметр качества. Вторым этапом является оценка РС ВПК по группе параметров. Третий этап моделирования служит для оптимизации топографии по всему комплексу исследуемых параметров. Этим требованиям в наибольшей мере отвечают круги CBN30 B126 100 L V K27-КФ40 ( $l = 5$ ) и ЛКВ50 B126 100 O V K27-КФ40 ( $l = 11$ ) с лингвистической оценкой «очень хорошо».

## Литература

- [1] Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. *Технология шлифования в машиностроении*. Санкт-Петербург, Политехника, 2007. 320 с.
- [2] Старков В.К. *Шлифование высокопористыми кругами*. Москва, Машиностроение, 2007. 688 с.
- [3] ГОСТ 25142–82. *Шероховатость поверхности. Термины и определения*. Москва, Изд-во стандартов, 1982. 68 с.
- [4] ГОСТ 24642–81. *Допуски формы и расположения поверхностей. Основные понятия и обозначения*. Москва, Изд-во стандартов, 1984. 68 с.
- [5] Солер Я.И., Лгалов В.В., Стрелков А.Б. Оценка режущих свойств абразивных кругов различной пористости по критерию формы плоских деталей штампов Х12. *Металлообработка*, 2012, № 1 (67), с. 5–10.
- [6] Солер Я.И., Шустов А.И. Пути улучшения микрогеометрии быстрорежущих пластин при шлифовании высокопористыми нитридборовыми кругами. *Научное обозрение*, 2014, № 8, ч. 1, с. 94–101.
- [7] Солер Я.И., Лгалов В.В. Изучение микротвердости формообразующих деталей штамповой оснастки при абразивном шлифовании. *Вестник ИрГТУ*, 2012, № 7 (66). с. 48–54.
- [8] Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. New Jersey, Wiley-Interscience, 1999. 787 p.
- [9] Sachs L. *Applied Statistics: A Handbook of Techniques*. New-York, Springer-Verlag, 1984. 707 p.
- [10] Уилер Д., Чамберс Д. *Статистическое управление процессами*. Москва, Альпина Бизнес Букс, 2009. 469 с.
- [11] ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002. *Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерения. Ч. 1. Основные понятия и определения*. Москва, Изд-во стандартов, 2002. 24 с.
- [12] Ali Y.M., Zhang L.C. A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 563–571.
- [13] Ali Y.M., Zhang L.C. Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 89–90, pp. 561–568.
- [14] Вятчинин Д.А. *Нечеткие методы автоматической классификации*. Минск, УП Технопринт, 2004. 219 с.
- [15] Мандров Б.И., Бакланов С.Д., Бакланов Д.Д., Влеско А.С., Путивский А.Н., Сухинина С.Д. Применение функции желательности Харрингтона при экструзионной сварке листов из полиэтилена марки ПЭНД. *Ползуновский альманах*, 2012, № 1, с. 62–64.
- [16] ГОСТ 2789–73. *Шероховатость поверхности, параметры, характеристики и обозначения*. Москва, Изд-во стандартов, 1976. 10 с.
- [17] ГОСТ 24643–81. *Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения*. Москва, Изд-во стандартов, 1981. 14 с.

## References

- [1] Kremen' Z.I., Iur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiia shlifovaniia v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. St. Petersburg, Politekhnik publ., 2007. 320 p.
- [2] Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Highly porous grinding circles]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007. 688 p.
- [3] GOST 25142–82. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniia* [State Standard 25142–82. The surface roughness. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform publ., 1982. 68 p.
- [4] GOST 24642–81. *Dopuski formy i raspolozheniia poverkhnostei. Osnovnye poniatiiia i oboznacheniiia* [State Standard 24642–81. Tolerances of form and position of surfaces. Basic concepts and notation]. Moscow, Standartinform publ., 1984. 68 p.
- [5] Soler Ya.I., Lgalov V.V., Strelkov A.B. Otsenka rezhushchikh svoistv abrazivnykh krugov razlichnoi poristosti po kriteriiu formy ploskikh detalei shtampov Kh12 [Evaluation of various porosity abrasive cutting properties by the criterion of form accuracy of the plane parts of steel X12]. *Metalloobrabotka* [Metalworking]. 2012, no. 1 (67), pp. 5–10.
- [6] Soler Ya.I., Shustov A.I. Puti uluchsheniia mikrogeometrii bystrorezhushchikh plastin pri shlifovaniu vysokoporistymi nitriddorovymi krugami [Ways of improving the micro-

- geometry of high-speed plates during polishing with highly porous boron nitride circles]. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review]. 2014, no. 8, pt. 1, pp. 94–101.
- [7] Soler Ya.I., Lgalov V.V. Izuchenie mikrotverdosti formoobrazuiushchikh detalei shtampovoi osnastki pri abrazivnom shlifovanii [Study of shaping die tooling parts microhardness under abrasive grinding]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2012, no. 7 (66), pp. 48–54.
- [8] Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. New Jersey, Wiley-Interscience, 1999. 787 p.
- [9] Sachs L. *Applied Statistics: A Handbook of Techniques*. New-York, Springer-Verlag, 1984. 707 p.
- [10] Wheeler D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsessami* [Statistical process control]. Moscow, Al'pina Biznes Buks publ., 2009. 469 p.
- [11] GOST R ISO 5725-1-2002. *Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniia. Ch. 1. Osnovnye poniatia i opredeleniia* [State Standard R ISO 5725-1-2002. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Pt. 1: Basic concepts and definitions]. Moscow, Standartinform publ., 2002. 24 p.
- [12] Ali Y.M., Zhang L.C. A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 563–571.
- [13] Ali Y.M., Zhang L.C. Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 89–90, pp. 561–568.
- [14] Viatchenin D.A. *Nechetkie metody avtomaticheskoi klassifikatsii* [Fuzzy methods of automatic classification]. Minsk, UP Tekhnoprint publ., 2004. 219 p.
- [15] Mandrov B.I., Baklanov S.D., Baklanov D.D., Vlesko A.S., Putivskii A.N., Sukhinina S.D. Primenenie funktsii zhelatel'nosti Kharringtona pri ekstruzionnoi svarke listov iz polietilena marki PEND [Application features desirability Harrington with extrusion welding sheets of polyethylene HDPE grade]. *Polzunovskii al'manakh* [Polzunovsky almanac]. 2012, no. 1, pp. 62–64.
- [16] GOST 2789-73. *Sherokhovatost' poverkhnosti, parametry, kharakteristiki i oboznacheniiia* [State Standard 2789-73. Surface roughness parameters, specifications and designations]. Moscow, Standartinform publ., 1976. 10 p.
- [17] GOST 24643-81. *Dopuski formy i raspolozheniia poverkhnostei. Chislovye znacheniiia* [State Standard 24643-81. Tolerances of form and position of surfaces. Numeric values]. Moscow, Standartinform publ., 1981. 14 p.

Статья поступила в редакцию 25.03.2016

## 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, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

**ШУСТОВ Андрей Иванович** (Иркутск) — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

**НГУЕН Мань Тием** (Иркутск) — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

## Information about the authors

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

**SHUSTOV Andrey Ivanovich** (Irkutsk) — Postgraduate, Department of Technology and Equipment of Mechanical Manufacturing, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

**NGUEN Mahn Tiem** (Irkutsk) — Postgraduate, Department of Technology and Equipment of Mechanical Manufacturing, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).