

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-96-111

УДК 629.923.1, 510.62

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ЗЕРНИСТОСТИ НИТРИДБОРОВЫХ КРУГОВ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 06X14H6Д2МВТ-Ш ПО МИКРОРЕЛЬЕФУ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

**Я.И. Солер, Нгуен Мань Тьем**

ИрНИТУ, г. Иркутск, Российская Федерация  
e-mail: solera@istu.irk.ru; nguyentanhtiemhn@gmail.com

*Выбор абразивных кругов — наиболее эффективное средство повышения производительности шлифования и качества получаемых деталей. Стохастический характер процесса предопределяет привлечение статистических методов для интерпретации выходных параметров, рассматривая их случайными величинами. Нарушение дисперсий и нормальности распределений при шлифовании делает целесообразным использование непараметрического метода статистики, в котором мерой положения выступают медианы, а мерой рассеяния — квартильные широты. К сожалению, статистические методы не позволяют предсказать комплексную оценку режущих способностей кругов одновременно по обоим мерам. Инновационным направлением данного исследования является привлечение для этих целей нечеткой логики при реализации процесса моделирования в среде MATLAB с использованием специального пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox. По результатам моделирования установлено, что при шлифовании деталей из закаленной коррозионно-стойкой стали 06X14H6Д2МВТ-Ш наилучшие показатели качества по шероховатости поверхностей дают круги CBN30 B151 100 OVK27-KФ40.*

**Ключевые слова:** шлифование, шероховатость, статистика, медиана, квартильная широта, нечеткая логика, функция желательности, алгоритм Мамдани.

## SEARCH FOR OPTIMAL GRAIN SIZE OF NITRIDE-BORON WHEELS DURING FLAT GRINDING OF PARTS MADE OF 06X14H6Д2МВТ-Ш STEEL ON SURFACE MICRORELIEF UNDER CONDITIONS OF FUZZY LOGIC SIMULATION

**Ya.I. Soler, M.T. Nguyen**

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation  
e-mail: solera@istu.irk.ru; nguyentanhtiemhn@gmail.com

*Selection of grinding wheels is the most effective means of enhancing both the efficiency of grinding and the quality of the manufactured parts. The process stochastic nature determines the use of the statistical methods for interpreting the output parameters while considering them as random values. Both violation of dispersions and deviation from the normal distributions during grinding make it appropriate to use the non-parametrical statistical method, which implies that the medians are considered the position measurer and quartile latitudes — the dispersion measurer. Unfortunately, the statistical methods cannot provide a complex evaluation*

*of the wheels cutting capacity using the both measurers simultaneously. An innovative approach to this analysis determines the usage of the fuzzy logic methods during the simulation process in the MATLAB environment with the help of the FuzzyLogicToolbox specialized additional package. The simulation showed that CBN30 B151 100 OVK27-KF40 wheels provide the best quality in terms of the surface roughness during grinding of the parts made of hardened corrosion-resistant 06X14H6Д2МБТ-III steel.*

**Keywords:** grinding, roughness, statistics, median, quartile width, fuzzy logic, desirability function, Mamdani algorithm.

Шлифование является процессом окончательной обработки ответственных высоконагруженных деталей, шероховатость которых доминирует в оценке их качества. Шероховатость характеризуется большим числом параметров, которые влияют друг на друга (ГОСТ 25142–82):  $R_a, R_q, R_z, R_{\max}, S, S_m, t_p, p = 5 \dots 95 \%$  [1]. Многие из этих переменных являются нелинейными, взаимозависимыми и трудно поддаются качественной оценке с высокой точностью. Таким образом, получить физические модели не представляется возможным, а экспериментальные их аналоги не могут быть исчерпывающими и имеют ограниченную применимость.

В работе [2] рассмотрены теоретические и экспериментальные модели шероховатости поверхности, полученные за период 1952–1992 гг., которые охватывают основные переменные шлифования. В более поздних работах [3, 4] предложены новые модели шлифования, учитывающие число рабочих зерен в круге на единицу площади. Модель, приведенная в работе [5], разработана при использовании стохастических подходов, позволяющих предсказать рельеф рабочей поверхности круга. Проблемы шлифования заключаются в том, что существует много способов измерения и оценок характеристик шероховатости поверхности, но среди них нет ни одного, позволяющего оценить микрорельеф поверхности по комплексу параметров шероховатости (ГОСТ 25142–82), учитывая при этом служебное назначение деталей.

В настоящем исследовании предложено использовать нечеткие модели для управления процессом шлифования по комплексу критериев шероховатости. Одновременно они могут использовать опыт, накопленный производителями, что невозможно обеспечить в теоретических и статистических моделях. Привлечение нечеткой логики способствует изучению остаточных напряжений [6] и режущих способностей шлифовальных кругов [7].

**Методы интерпретации экспериментальных данных при шлифовании.** Для реализации концепции нечеткой логики используются экспериментальные данные, полученные при шлифовании. Особенность изучаемого процесса заключается в том, что абразивные зерна в инструменте имеют произвольную форму, хаотическое закрепление в

связке и различное радиальное расположение относительно некоторого идеального диска, а также число активных зерен и режущих кромок на единицу площади его 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  $l = \overline{1; k}$ :

$$\{y_{lv}\}, \quad v = \overline{1; n}, \quad (1)$$

где  $v$  — число параллельных опытов, которые желательно проводить с равным  $n$ .

Статистические методы разделяются на две группы: параметрическую и непараметрическую, в частности ранговую. Каждая из групп имеет “свое поле” [8] для эффективного применения. В первом случае необходимо обеспечить выполнение двух ограничений, накладываемых на СВ: однородность дисперсий отклонений и нормальность распределений. Изложенные требования при шлифовании чаще всего нарушаются в той или иной мере, что может сопровождаться значимым смещением оценок, доверительных границ и коэффициентов доверия [8]. На практике этот метод приходится иногда применять и в тех ситуациях, когда (1) не удовлетворяют приведенным требованиям. Тогда оценки СВ, их доверительных границ нуждаются в уточнении. Для этого целесообразно использовать непараметрический метод, который не связан с конкретным семейством распределений и не использует его свойств. Случайные величины оцениваются следующими одномерными распределениями частот [8–11]:

- мерами положения (опорными значениями)

— средними

$$\bar{y}_l = y_{l\bullet}, \quad (2)$$

— медианами

$$\tilde{y}_l; \quad (3)$$

- мерами рассеяния (прецизионностью)

— стандартами отклонений

$$SD_l, \quad (4)$$

— размахами

$$R_l = (y_{\max} - y_{\min})_l, \quad (5)$$

— квартильными широтами

$$КШ_l = (y_{0,75} - y_{0,25})_l. \quad (6)$$

Из теоретической статистики известно, что на одномерных распределениях частот (2), (4) и (5) базируется параметрический метод, а на

(3), (6) — ранговые статистики. Принятие нуль-гипотез ( $H_0$ ) относительно однородности дисперсий отклонений и нормальности распределений рассмотрено в [12, 13]. Для снижения трудоемкости статистических расчетов в работе привлечена программа *Statistica 6.1.478.0*.

Нечеткая логика предназначена для создания математической модели на базе лингвистических рассуждений, в которых принципиальную роль играет язык и опыт экспертов. В этом смысле нечеткая логика равнозначна теории нечетких множеств, т.е. классов с неточными, размытыми границами. Теория нечетких множеств [6, 7] представляет собой обобщение и переосмысление важнейших направлений классической математики. При этом под нечеткими множествами  $A_l$  понимаются совокупности упорядоченных пар, составленных из элементов  $y_{lv}$  универсальных множеств  $\{y_{lv}\}$  и соответствующих степеней принадлежности  $\mu_A(y_{lv})$ :

$$A_l = \{(y_{lv}, \mu_A(y_{lv})) | y_{lv} \in \{y_{lv}\}\}, \quad (7)$$

где  $\mu_{A_l}(y_{lv})$  — характеристические функции, указывающие на степень принадлежности  $y_{lv}$  к нечетким множествам  $A_l$ .

Математическая теория нечетких множеств позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и вести нечеткие рассуждения.

**Методика эксперимента.** Натурные опыты проводились при следующих постоянных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3E711B; круги формы 1A1 с размерами  $200 \times 20 \times 76 \times 5$  мм, технологические параметры — скорость резания  $v_k = 28$  м/с, продольная подача  $s_{пр} = 6$  мм/мин, поперечная подача  $s_{п} = 4$  мм/дв. ход, глубина резания  $t = 0,01$  мм, операционный припуск  $z = 0,1$  мм, СОЖ — 5%-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-0014842-98), подаваемая поливом на заготовку в количестве 7...10 л/мин; число дублирующих опытов в (1) —  $n = 30$ . Объект исследования — образцы из стали 06X14H6Д2МВТ-Ш с механическими свойствами:  $\sigma_B = 1310 \dots 1400$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1210 \dots 1240$  МПа,  $\delta = 12 \dots 14\%$ ,  $\psi = 57 \dots 60\%$  и размерами  $B \times L \times H = 60 \times 60 \times 60$  мм, шлифуемые по торцу  $B \times L$ . Индекс  $l = \bar{1}; \bar{4}$  отражает характеристики высокопористых кругов (ВПК): 1 — CBN30 B76 100OVK27-КФ40; 2 — CBN30 B107 100OVK27-КФ40; 3 — CBN30 B126 100OVK27-КФ40; 4 — CBN30 B151 100OVK27-КФ40 [14, 15], в которых возрастают только размеры зерен (зернистость) кубического нитрида бора от B76 до B151. Параметры шероховатости  $R_a, R_z, R_{max}, S$  и  $S_m$  измерены на профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр» в двух взаимно ортогональных направлениях  $i = \bar{1}; \bar{2}$ : соответственно по векторам  $s_{п1}$  ( $R_{a1}, R_{z1}, R_{max1}$  и т.д.) и  $s_{п2}$  ( $R_{a2}, R_{z2}, R_{max2}$  и т.д.).

При реализации процесса моделирования нечеткой логики в среде *MATLAB* использован специальный пакет расширения *Fuzzy Logic Toolbox*. Он обладает простым и хорошо продуманным интерфейсом, позволяющим легко проектировать и диагностировать нечеткие модели [16–18]. Для разработки и применения систем нечеткого вывода в интерактивном режиме привлечены следующие графические средства:

- редактор системы нечеткого вывода *FIS (FIS Editor)*;
- редактор функций принадлежности системы нечеткого вывода (*Membership Function Editor*);
- редактор правил системы нечеткого вывода (*Rule Editor*);
- программа просмотра правил системы нечеткого вывода (*Rule Viewer*);
- программа просмотра поверхности системы нечеткого вывода (*Surface Viewer*).

Для оценки качества шероховатости деталей использована функция желательности  $d$ , предложенная Харрингтоном [19]. В основе ее построения лежит идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности. Шкала желательности относится к психофизическим категориям. Ее назначение — установление соответствия между физическими и психологическими параметрами. Здесь под физическими параметрами понимаются возможные отклики, характеризующие функционирование исследуемого объекта. Назначение шкалы желательности — установление соответствия между полученными значениями показателей свойств, режимов и оценками желательности того или иного показателя процесса.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Уменьшение исследуемых параметров шероховатости сопровождается ростом эксплуатационных показателей деталей машин [1]. Акцент в задаче нечеткой логики при поиске зернистости ВПК сделан на снижение наибольших значений из двух возможных сечений  $i = \overline{1; 2}$ . По данным работы [1], таковыми являются:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{\max 1}$  и  $S_{m2}$ . Шаги  $S_1$  и  $S_2$  в обоих сечениях различаются слабо и неоднозначно, поэтому в исследовании ограничились одним шагом  $S_1$ .

В рамках параметрического метода принятие  $H_0$  относительно однородности дисперсий отклонений является обязательным требованием к СВ. В силу изложенного тестирование (1) было выполнено по критериям  $m = \overline{1; 3}$ : 1 — Хартли, Кохрена, Бартлетта; 2 — Левене; 3 — Брауна–Форсайта. В табл. 1 содержатся результаты тестирования (1) на гомоскедастичность распределений множеств  $l = \overline{1; 4}$ . Представленные результаты показывают, что  $H_0$  отклонены по всем критериям для всех параметров шероховатости (знаки “–” в последнем столбце). Нормальность распределений ( $H_0$ ) протестирована по критерию

Шапиро – Уилка. Из теоретической статистики известно, что  $H_0$  рассматриваются принятыми, если подтверждается неравенство:  $\alpha_l > 0,5$  (табл. 2).

Нормальные распределения имеют место только в четырех случаях шлифования (подчеркнутые значения, см. табл. 2) из 20. В условиях нарушений однородности и нормальности распределений экспериментальных данных оправданным оказалось привлечение непараметрического (в частности рангового) метода статистики. В этом случае к входным данным относятся два параметра: (3) и (6), значения которых по результатам эксперимента и их статистической обработки приведены в табл. 3.

Таблица 1

**Проверка однородности дисперсий при принятом уровне значимости  $\alpha_m = 0,05$**

Параметр	Расчетные уровни значимости $\alpha_m$ для множеств $l = 1; 4$ по критериям $m = 1; 3$			Принятие $H_0$
	1	2	3	
$R_{a1}$	0,999	1,000	0,999	–
$R_{z1}$	1,000	1,000	1,000	–
$R_{max1}$	0,991	0,999	0,996	–
$S_1$	0,995	0,576	0,563	–
$S_{m2}$	0,998	0,925	0,772	–

Таблица 2

**Проверка нормальности распределений по критерию Шапиро – Уилка**

Параметр	Расчетный уровень значимости $\alpha_l$ при переменных $l = 1; 4$			
	1	2	3	4
$R_{a1}$	0,0100	0,0175	0,2897	0,0184
$R_{z1}$	0,1324	0,0239	<u>0,7746</u>	<u>0,9949</u>
$R_{max1}$	0,1806	0,2968	<u>0,7938</u>	<u>0,8116</u>
$S_1$	0,00000	0,0032	<u>0,6100</u>	0,0144
$S_{m2}$	0,00005	0,0827	0,0551	0,0129

Таблица 3

**Входные данные для исследования влияния зернистости ВПК на качество шлифованных деталей**

Круг $l = 1; 4$	Параметр, мкм									
	$R_{a1}$		$R_{max1}$		$S_1$		$R_{z1}$		$S_{m2}$	
	$\tilde{y}$	КШ	$\tilde{y}$	КШ	$\tilde{y}$	КШ	$\tilde{y}$	КШ	$\tilde{y}$	КШ
1	0,614	0,07	3,722	0,543	13,192	1,745	2,281	0,266	83,36	28,393
2	0,584	0,119	3,325	0,443	13,145	1,618	2,122	0,205	96,746	57,239
3	0,602	0,27	3,584	1,271	13,395	2,071	2,241	0,955	84,909	48,243
4	0,565	0,11	3,369	0,788	12,755	1,514	2,118	0,423	80,519	36,885

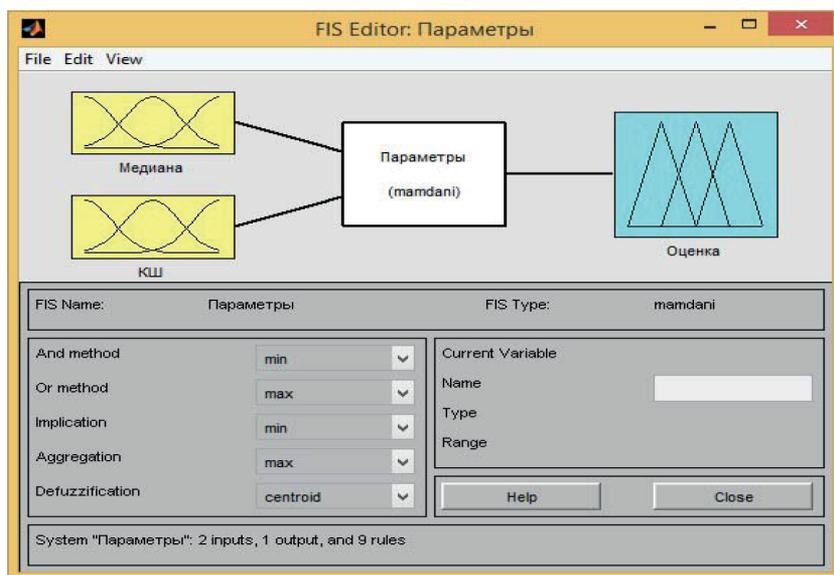
Примечание. В табл. 1–3 круги CBN30 100 OVК27-КФ40  $l$ : 1 – В76, 2 – В107, 3 – В126, 4 – В151.

В данном исследовании апробирована целесообразность применения метода нечеткой логики для создания экспертной системы классификации кругов по комплексу параметров шероховатости. На вход системы подаются атрибуты параметров  $R_{a1}$ ,  $R_{z1}$ ,  $R_{max1}$ ,  $S_1$  и  $S_{m2}$  в виде (3) и (6), а выходом служат оценки качества поверхности детали. Реализация нечеткой логики включает в себя два последовательно выполняемых этапа.

1. Выбор зернистости ВПК в условиях одновременного снижения мер положения и рассеяния для каждого параметра шероховатости в отдельности.

2. Выбор зернистости кругов по комплексной оценке состояния микрогеометрии поверхности.

Методы статистики не позволяют вести анализ качества шлифования одновременно по обеим мерам одномерного распределения частот, что является большим их недостатком. На первом этапе исследования создана нечеткая модель (рис. 1), в состав которой включены три переменные: входные —  $\tilde{y}_l$ , КШ $_l$ ,  $l = \overline{1;4}$ , отражающие варьирование зернистости в интервале [B76, B151], и одна выходная (качество поверхности). Каждая переменная представлена тремя функциями (7), которые при фаззификации зависят от соответствующего события [20]. В настоящем исследовании привлечен алгоритм Мамдани, в котором выбраны функции принадлежности для термов: “Good” — z-подобная ( $zmf$ ), “Middle” — пи-подобная ( $pimf$ ) и “Bad” — z-подобная ( $zmf$ ). Диапазон и параметры входа представлены в табл. 4.



**Рис. 1.** Система для оценки качества деталей при варьировании зернистости кругов

**Диапазон и параметры входа при поиске зернистости по отдельным шероховатостям**

Параметр	Меры	Диапазон	Good	Middle	Bad
$R_{a1}$	$\tilde{y}$	[0,5; 0,63]	[0,52; 0,56]	[0,52; 0,56; 0,57; 0,61]	[0,57; 0,61]
	КШ	[0,07; 0,27]	[0,1; 0,16]	[0,1; 0,16; 0,18; 0,24]	[0,18; 0,24]
$R_{max1}$	$\tilde{y}$	[3,3; 3,8]	[3,35; 3,55]	[3,35; 3,55; 3,55; 3,75]	[3,55; 3,75]
	КШ	[0,4; 1,3]	[0,5; 0,8]	[0,5; 0,8; 0,9; 1,2]	[0,9; 1,2]
$S_{m2}$	$\tilde{y}$	[80; 97]	[81; 88]	[81; 88; 89; 96]	[89; 96]
	КШ	[28,4; 57,4]	[30,4; 41,4]	[30,3; 41,3; 44,3; 55,3]	[44,4; 55,4]
$R_{z1}$	$\tilde{y}$	[2 ;2,5]	[2,05; 2,25]	[2,05; 2,25; 2,25; 2,45]	[2,25; 2,45]
	КШ	[0,2; 1]	[0,3; 0,55]	[0,3; 0,55; 0,65; 0,9]	[0,65; 0,9]
$S_1$	$\tilde{y}$	[12,7; 13,4]	[12,8; 13]	[12,8; 13; 13,1; 13,3]	[13,1; 13,3]
	КШ	[1,5 ;2,1]	[1,6; 1,8]	[1,6; 1,8; 1,8; 2]	[1,8; 2]

При создании функций принадлежности для выходной переменной “Вывод” использованы три категории качества шлифованных деталей: хорошее, нормальное, плохое — с соответствующими терминами: *zmf*, *pimf*, *smf*. Их шкалы и функции желательности представлены в табл. 5. При этом предполагается, что функция желательности варьируется в интервале  $d \in [0; 1]$ .

Таблица 5

**Параметры выхода модели в задаче поиска оптимальной зернистости по каждому параметру шероховатости**

Оценка	Выход		
Лингвистическая	Плохой	Нормальный	Хороший
Числовая	[0,3; 0,4]	[0,3; 0,4; 0,6; 0,7]	[0,6; 0,7]

После создания функций принадлежности были определены правила нечетких рассуждений для разрабатываемой системы, которые созданы с помощью графического интерфейса *Rule Editor*. В табл. 6

Таблица 6

**Нечеткие правила для системы классификации деталей**

Вариант	$\tilde{y}_l$	КШ <sub>l</sub>	Вывод
1	Good	Good	Хорошо
2	Good	Middle	Хорошо
3	Good	Bad	Нормально
4	Middle	Good	Хорошо
5	Middle	Middle	Нормально
6	Middle	Bad	Плохо
7	Bad	Good	Нормально
8	Bad	Middle	Плохо
9	Bad	Bad	Плохо

представлены нечеткие правила для системы классификации качества поверхности деталей. В пакете *Fuzzy Logic Toolbox* есть два графических интерфейса, которые помогают пользователю упростить просмотр правил рассуждений (*Rule Viewer*) и поверхности рассуждений (*Surface Viewer*). Используя графический формат, выявили все возможные упрощения, что позволило предсказать выходную переменную — вывод. Каждое изменение свойства детали отображается в просмотре правил вывода, соответственно меняя его. На рис. 2 приведен пример просмотра правил вывода для наибольшей шероховатости в поперечном направлении, ввод входных переменных представлен в символьном виде.

Выполнение нечетких рассуждений, преобразование их в числовые значения показано на рис. 3, где проанализировано и представлено на экране значение выходной переменной  $R_{\max 1l}$ .

Программа работает не только в ручном режиме, но и в автоматическом на базе данных, приведенных в табл. 3. Результаты прогнозирования с использованием нечеткой логики отражены в табл. 7 по всем ВПК  $l = \overline{1; 4}$  для каждого параметра шероховатости.

Результаты (см. табл. 7) показывают, что ВПК с наибольшей зернистостью В151 в большей мере удовлетворяет снижению всех параметров шероховатости, что ведет к повышению эксплуатационных свойств деталей машин. Как известно, с учетом их служебного назначения могут меняться конкретные требования к отдельным параметрам микрорельефа поверхности. Для повышения прочности, в том числе усталостной, целесообразно снижать параметры  $R_{\max 1}$  и

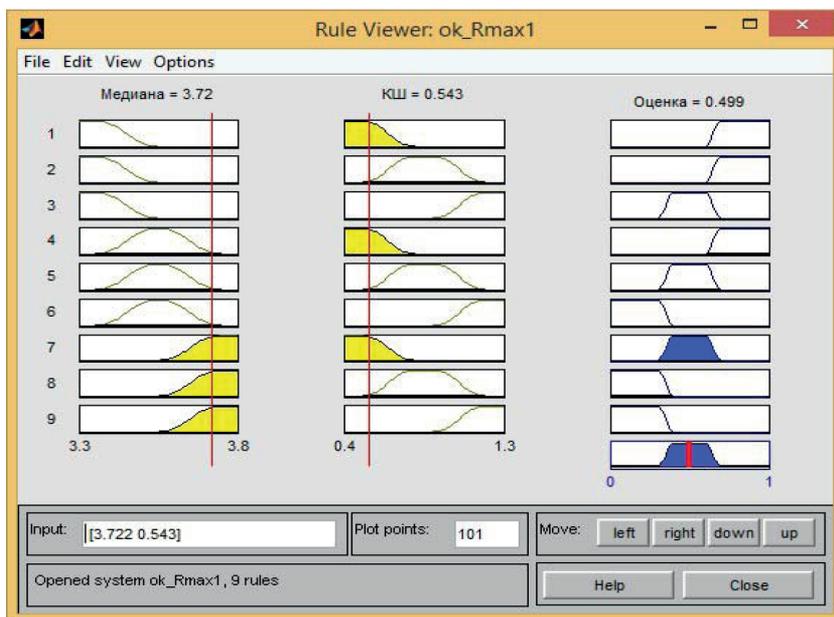


Рис. 2. Просмотр правил системы классификации кругов для параметра  $R_{\max 1}$

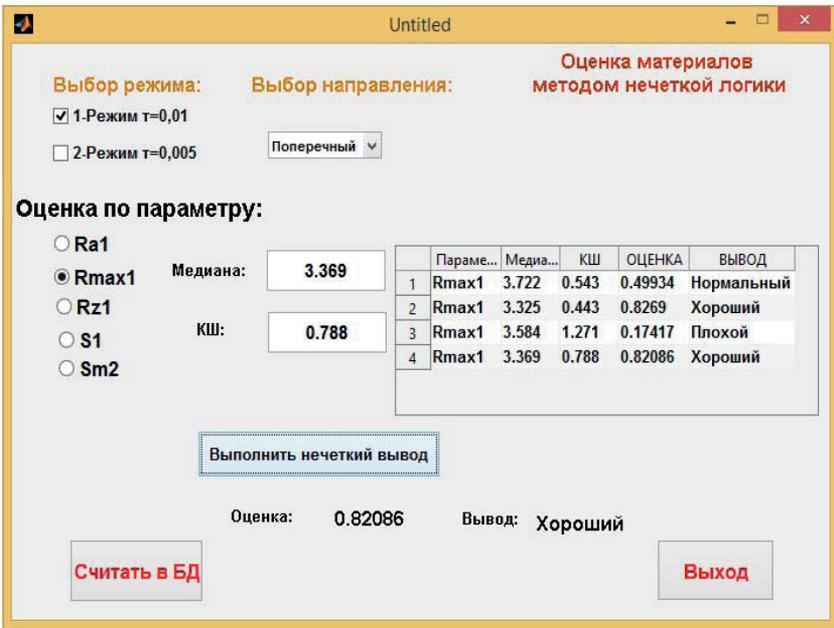


Рис. 3. Окно графического приложения системы для параметра  $R_{\max l}$ , полученного при шлифовании ВПК  $l = \overline{1; 4}$

Таблица 7

Результаты нечеткой логики по выбору зернистости ВПК для каждого исследуемого параметра шероховатости

Круг $l$	Функция желательности $d_l$				
	Параметры шероховатости				
	$R_{a1}$	$R_{\max 1}$	$S_1$	$R_{z1}$	$S_{m2}$
1	0,5000	0,4993	0,4182	0,8111	0,8231
2	0,6556	0,8269	0,7851	0,8227	0,1731
3	0,1746	0,1742	0,1731	0,1745	0,5408
4	0,8087	0,8209	0,8269	0,7271	0,8214

Примечание. Зернистость  $l$ : 1 – В76, 2 – В107, 3 – В126, 4 – В151

$S_{m2}$  [1]. В этом случае выбор круга  $l = 4$  является наилучшим, т.е. детали из пластичной стали 06Х14Н6Д2МВТ-Ш следует шлифовать крупнозернистым ВПК СВN30 В151. Но если в чертеже детали указаны требования по одному параметру  $R_{\max 1}$ , то лучше воспользоваться ВПК  $l = 2$  с зернистостью В107. В то же время для минимизации только средних шагов в продольном направлении обработку деталей целесообразно вести мелкозернистым кругом В76 ( $l = 1$ ), когда уменьшение зерен ведет к увеличению их числа на площади контакта с заготовкой. Сказанное сопровождается отмеченным снижением средних шагов  $S_{m2}$ .

Конечной задачей данного исследования служит поиск оптимальной зернистости среди ВПК  $l = \overline{1; 4}$ , что позволило бы минимизиро-

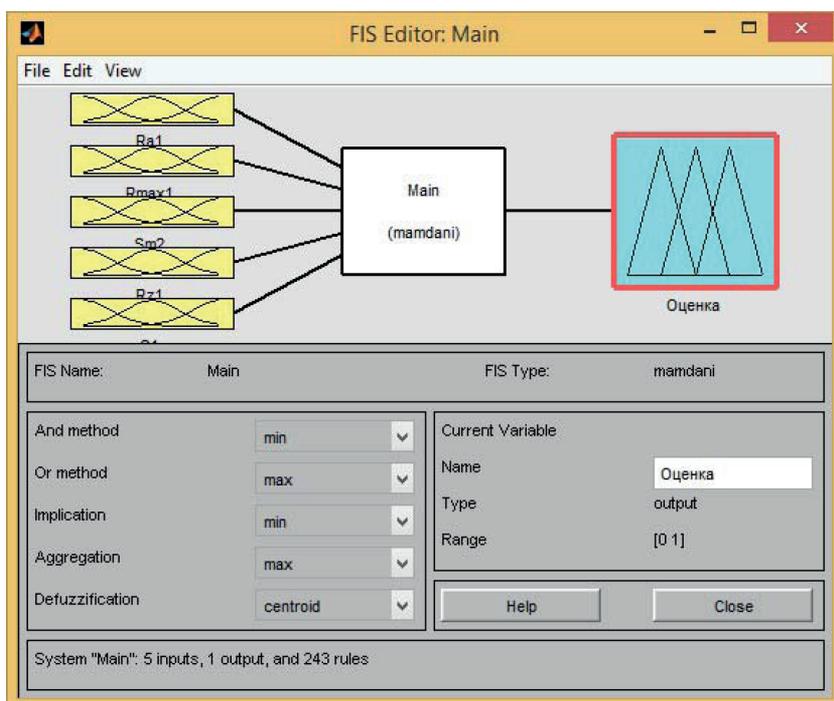


Рис. 4. Система комплексной оценки параметров качества деталей

вать шероховатость по мерам положения и рассеяния для всего комплекса параметров качества. С этой целью создана модель из шести переменных: пяти входных и одного выходного (рис. 4). Функции принадлежности у каждой переменной входа соответствуют переменным выхода, полученным при решении первой задачи исследования (см. табл. 7). Они представлены числовым диапазоном  $[0; 1]$ , а их разбивка на три класса показана в табл. 8.

Таблица 8

**Параметры входа при поиске зернистости ВПК по комплексной оценке качества шлифованных деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ-Ш**

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

Функция принадлежности для выходной переменной “Оценка” представлена пятью классами качества шлифованных деталей: “очень плохо”, “плохо”, “удовлетворительно”, “хорошо”, “очень хорошо” и отображена в виде *trimf*. “Оценка” характеризуется диапазоном  $[0; 1]$  и представлена шкалой и функцией желательности на рис. 5 и в табл. 9.

Правила нечетких рассуждений для разработанной системы включают  $N = 3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 243$  возможных сочетания выходных параметров. Первые тридцать из них представлены на рис. 6. Он наглядно иллюстрирует, что наиболее важными свойствами качества являются

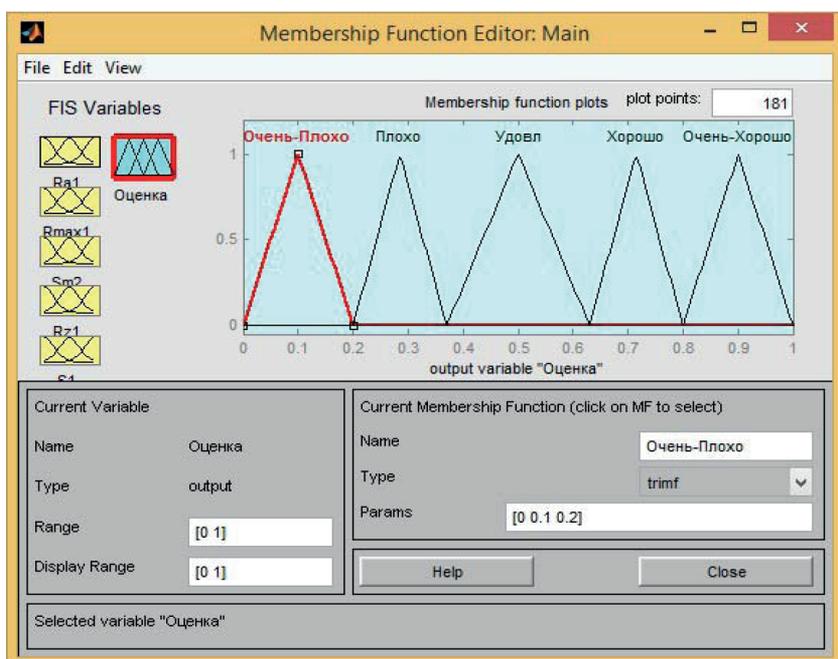


Рис. 5. Функции принадлежности для выходной переменной “Оценка” при решении задачи поиска оптимальной зернистости ВПК по комплексной оценке качества шлифованных деталей

Таблица 9

Параметры “Оценка” при поиске оптимальной зернистости ВПК по комплексной оценке качества шлифованных деталей

Вид оценки	Параметры выхода				
Лингвистическая	Очень плохо	Плохо	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо
Числовая $d$	[0,0; 0,2]	[0,2; 0,37]	[0,37; 0,63]	[0,63; 0,80]	[0,8; 1,00]

параметры  $R_{a1}$ ,  $R_{max1}$ ,  $S_{m2}$ . Если они оценены как “хорошие”, то при любых оценках параметров  $R_{z1}$ ,  $S_1$  всегда имеем шкалу желательности “хорошо, очень хорошо”.

Полученные результаты по влиянию зернистости ВПК на комплексную оценку микрорельефа поверхности деталей из коррозионно-стойкой стали 06X14H6Д2МВТ-Ш представлены в табл. 10.

Моделирование нечеткой логики позволило установить, что ВПК с зернистостью В151 в наибольшей мере обеспечивают комплексное снижение мер положения и рассеяния по всем исследуемым параметрам шероховатости. Полученные результаты оказались близкими к тем, которые были предсказаны на первом этапе исследования. Выбор характеристики ВПК важен при робастном проектировании операций шлифования, когда необходимо шлифование провести наилучшим (базовым) инструментом, который позволил бы оптимизировать все целевые функции процесса с наибольшей эффективностью.

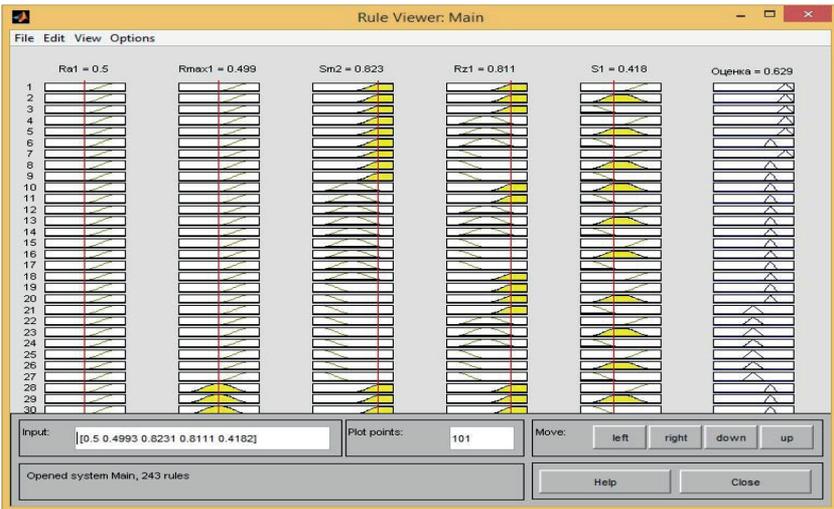


Рис. 6. Просмотр правил вывода “Оценка” при комплексном анализе качества шлифованных деталей

Таблица 10

**Влияние зернистости ВПК на комплексную оценку поверхностей деталей**

Зернистость ( $l = \overline{1; 4}$ )	$d$	Вывод
V76 (1)	0,6292	Удовлетворительно
V107 (2)	0,6341	Хорошо
V126 (3)	0,1687	Очень плохо
V151 (4)	0,8113	Очень хорошо

**Выводы.** 1. Шероховатость характеризуется большим числом стандартизованных параметров, которые оцениваются мерами положения и рассеяния. Это затрудняет выбор кругов с использованием методов статистики.

2. В условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений экспериментальных данных для реализации нечеткой логики оправданным оказалось привлечение непараметрических оценок мер положения и рассеяния, к которым относятся медианы  $\tilde{y}_l$  и квартильные широты  $KШ_l$ .

3. По результатам моделирования нечеткой логики в среде MATLAB установлено, что круги ВПК СВН30 V151 1000VK27-КФ40 при шлифовании деталей из стали 06X14H6Д2МВТ-Ш обеспечивают наилучшее качество поверхности по комплексной оценке шероховатости. Использование данных кругов повышает эффективность робастного проектирования шлифовальных операций, поскольку поиск базовых моделей множественного дисперсионного анализа ведется инструментами оптимальной характеристики.

4. Результаты моделирования на первом этапе исследования могут использоваться для решения локальных проблем шлифования, напри-

мер, выбора зернистости кругов для минимизации одного из параметров качеств с учетом обеих мер положения и рассеяния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В. и др.* / под ред. А.Г. Суслова. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. *Tonshoff H.K.* Modelling and simulation of grinding processes // *Annals of the CIRP*. 1992. Vol. 41 (2). P. 677–688.
3. *Badger J.A., Torrance A.A.* A computer program to predict grinding forces from wheel surface profiles using slip-line fields // *Proceedings of the Conf. in Adv. Man. Tech., San Sebastian*, 1998. P. 6–8.
4. *Badger J.A., Torrance A.A.* The relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance // *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*. 2000. Vol. 40. P. 1787–1811.
5. *Hou Z.B., Komanduri R.* On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process // *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*. 2003. Vol. 43. P. 1579–1593.
6. *Ali Y.M., Zhang L.C.* Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach // *Journal of Materials Processing Technology*, 1999. P. 561–568.
7. *Ali Y.M., Zhang L.C.* A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel // *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*. 44. 2004. 563 p.
8. *Hollander M., Wolfe D.A.* Nonparametric statistical methods, Second Edition // *Wiley-Interscience*. 1999. 787 p.
9. *ГОСТ 5725-2-2012.* Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Введен 01.11.2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 58 с.
10. *Закс Л.* Статистическое оценивание / пер. с нем. М.: Статистика, 1976. 598 с.
11. *Уиллер Д., Чамберс Д.* Статистическое управление процессами / пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 469 с.
12. *Солер Я.И., Прокопьева А.В.* Исследование влияния выхаживания на микрорельеф пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора // *Обработка металлов (технология, оборудование и инструменты)*. 2009. № 1 (42). С. 24–27.
13. *Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu.* Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness // *Russian engineering research*. 2010. Vol. 30. No. 3. P. 251–261.
14. *ГОСТ Р 53922-2010.* Порошки алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора). Зернистость и зерновой состав шлифпорошков. Контроль зернового состава. Введен 27.10.2005. М.: Стандартинформ, 2009. 15 с.
15. *ГОСТ Р 52587-2006.* Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твердости. Введен 16.11.2006. М.: Стандартинформ, 2007. 9 с.
16. *Вятчин Д.А.* Нечеткие методы автоматической классификации: Монография. Минск: УП Технопринт, 2004. 219 с.
17. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств / пер. с франц. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
18. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
19. *Мандров Б.И., Бакланов С.Д., Бакланов Д.Д.* Применение функции желательности Харрингтона при экструзионной сварке листов из полиэтилена марки ПЭНД // *Ползуновский альманах*. 2012. № 1. С. 62–64.

20. *Jaya A.S.M., Hashim S.Z.M. and Rahman M.N.A.* Fuzzy logic-based for predicting roughness performance of TiAlN coating // In Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2010. 10th International Conference. 2010. P. 91–96.

## REFERENCES

- [1] Suslov A.G., Bezyazichny V.F., Panfilov Y.V. *Inzheneriya poverkhnosti detaley* [Surface Engineering Details]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 320 p.
- [2] Tonshoff H.K. Modelling and simulation of grinding processes. *Annals of the CIRP*, 1992, vol. 41 (2), pp. 677–688.
- [3] Badger J.A., Torrance A.A. A Computer Program to Predict Grinding Forces from Wheel Surface Profiles Using Slip-Line Fields. *Proc. of the Conf. in Adv. Man. Tech.*, San Sebastian, 1998, pp. 6–8.
- [4] Badger J.A., Torrance A.A. The Relation between the Traverse Dressing of Vitrified Grinding Wheels and Their Performance. *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*, 2000, vol. 40, pp. 1787–1811.
- [5] Hou Z.B., Komanduri R. On the Mechanics of the Grinding Process. Part I. Stochastic Nature of the Grinding Process. *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1579–1593.
- [6] Ali Y.M., Zhang L.C. Surface Roughness Prediction of Ground Components Using a Fuzzy Logic Approach. *J. of Materials Processing Technology*, 1999, pp. 561–568.
- [7] Ali Y.M., Zhang L.C. A Fuzzy Model for Predicting Burns in Surface Grinding of Steel. *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*, 2004, vol. 44. 563 p.
- [8] Hollander M., Wolfe D.A. Nonparametric statistical methods. 2nd Edition. *Wiley-Interscience*, 1999. 787 p.
- [9] Standard RF GOST 5725-2–2012. *Tochnost' (pravil'nost' I pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Chast' 2. Osnovnoy metod opredeleniya povtoryayemosti i vosproizvodimosti standartnogo metoda izmereniy* [State Standard 5725-2–2012 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2. Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement metho]. Moscow, Izd. Standartov Publ., 2002. 58 p.
- [10] Zaks L. Russ. ed.: *Statisticheskoye otsenivaniye* [Statistical estimation]. Trans. from German. Moscow, Statistica Publ., 1976. 598 p.
- [11] Wheeler Donald J., Chambers David S. *Understanding Statistical Process Control*. SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1986.
- [12] Soler Ya.I., Prokop'yeva A.V. Research into sparking-out influence on the P9M4K8 plate microrelief while applying CBN (cubic boron nitride) grinding technology. *Obrabotka metallov* [Metal Working and Material Science], 2009, no. 1 (42), pp. 24–27 (in Russ.).
- [13] Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Selecting Abrasive Wheels for the Plane Grinding of Airplane Parts of the Basis Surface Roughness. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, no. 3, pp. 251–261.
- [14] Standard RF GOST R 53922–2010. *Poroshki almaznyye I iz kubicheskogo nitrída bora (el'bora). Zernistost' I zernovoy sostav shlifporoshkov. Kontrol' zernovogo sostava* [State Standard R 53922–2010. Powders of diamond and cubic boron nitride (CBN)]. Grain size and grain structure of grinding powders. Control of grain composition]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 15 p.
- [15] Standard RF GOST R 52587–2006. *Instrument abrazivnyy. Oboznacheniya i metody izmereniya tverdosti* [State Standard R 52587–2006. Abrasive tool. Notation and methods of measurement of hardness]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 9 p.
- [16] Vyatchenin D.A. *Nechetkiye metody avtomaticheskoy klassifikatsii* [Fuzzy Methods of Automatic Classification]. Minsk, UP Tekhnoprint Publ., 2004. 219 p.

- [17] Kofman A. Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv [Introduction to the Theory of Fuzzy Sets]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 432 p.
- [18] Leonenkov A.V. Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i FuzzyTech [Fuzzy Modeling in MATLAB and FuzzyTech]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2005. 736 p.
- [19] Mandrov B.I., Baklanov S.D., Baklanov D.D. Application of the Desirability Function at Harrington Extrusion Welding Sheets of Polyethylene Grade HDPE. *Polzunovsky Almanac*, 2012, no. 1, pp. 62–64 (in Russ.).
- [20] Jaya A.S.M., Hashim S.Z.M., Rahman M.N.A. Fuzzy Logic-Based for Predicting Roughness Performance of TiAlN Coating. *In Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2010 10th International Conference on*, 2010, pp. 91–96.

Статья поступила в редакцию 20.04.2015

Солер Яков Иосифович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Технология машиностроения” Иркутского национального исследовательского технического университета.

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

Soler Ya.I. — Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Irkutsk National Research Technical University.

Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova 83, Irkutsk, 664074 Russian Federation.

Нгуен Мань Тием — аспирант кафедры “Технология машиностроения” Иркутского национального исследовательского технического университета.

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

Nguyen M.T. — Ph.D. student, Department of Mechanical Engineering, Irkutsk National Research Technical University.

Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova 83, Irkutsk, 664074 Russian Federation.

#### **Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Солер Я.И., Нгуен Мань Тием. Поиск оптимальной зернистости нитридборных кругов при плоском шлифовании деталей из стали 06X14H6Д2МВТ-III по микро-рельефу поверхности в условиях моделирования нечеткой логики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 6. С. 96–111.

#### **Please cite this article in English as:**

Soler Ya.I., Nguyen M.T. Search for optimal grain size of nitride-boron wheels during flat grinding of parts made of 06X14H6Д2МВТ-III steel on surface microrelief under conditions of fuzzy logic simulation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 6, pp. 96–111.