

УДК 621.923.1

DOI 10.18698/0536-1044-2016-5-59-73

Технологические резервы повышения качества шлифования пластин из быстрорежущей стали повышенной производительности

Я.И. Солер, Ван Кань Нгуен

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

Technological Reserves of Improving Grinding Quality of High Speed Steel Plates with Improved Productivity

Y.I. Soler, Van Canh Nguyen

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



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

i Выявлены резервы повышения качества быстрорежущих пластин (БП) из сталей Р9М4К8 и Р12Ф3К10М3, использование которых в инструментальном производстве сдерживается их низкой шлифуемостью. Выходными параметрами процесса шлифования приняты параметры шероховатости R_a и R_{max} (ГОСТ 2789–73) и отклонения от плоскостности (ГОСТ 24642–81) — основной EFE_{max} и вспомогательные EFE_a и EFE_q , называемые соответственно средним арифметическим и квадратичным показателями. В качестве абразивного инструмента выбран высокопористый круг (ВПК) Norton 5SG46K12VXP, зерна синтеркорунда в котором имеют повышенную режущую способность по сравнению с традиционным электрокорундом, в частности, легированным хромом — 34AF60K6V5. Возможности ВПК из синтеркорунда выявлены при реализации выхаживания с помощью непараметрического метода статистики, который в условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений имеет преимущества перед параметрическими оценками. Одномерные распределения частот по медианам показали, что выхаживание БП обеспечивает наиболее значимое снижение медиан отклонений от плоскостности (до 1,25–1,3 раз) при числе ходов: $j = 6$ для БП Р9М4К8 и $j = 8$ для БП Р12Ф3К10М3. При этом для БП Р12Ф3К10М3 параметр R_{max} снижается на одну категориальную величину (КВ) по ГОСТ 2789–73, а параметр R_a — в пределах КВ. Для БП Р9М4К8 высоты R_{a1} и R_{max1} характеризуются соответственно значениями 0,05 и 0,32 мкм и находятся в пределах КВ. Указанное число выхаживающих ходов учитывается и при оценке прецизионности процесса.

Ключевые слова: шлифование, выхаживание, меры положения, среднее, медиана, меры рассеяния, стабильность процесса, круги из синтеркорунда, круги из хромистого электрокорунда.

i This study identifies methods of improving the quality of R9M4K8 and R12F3K10M3 high-speed steel plates, the use of which in tool manufacturing is restricted by their low grindability. The roughness parameters R_a and R_{max} (GOST 2789–73) and flatness deviation parameters (GOST 24642–81), namely the basic parameter EFE_{max} and the supplementary parameters EFE_a and EFE_q , called the arithmetic and quadratic indexes respectively, are accepted as the output grinding parameters. The Norton 5SG46K12VXP high-porous wheel (HPW) is chosen as an abrasive tool. Its sintercorundum grains have an improved cutting capacity compared to traditional electrocorundum, namely 34AF60K6V5 alloyed chrome.

The capabilities of high-porous sintercorundum wheels are shown at the spark-out stage using the non-parametric statistics method, which has advantages compared to parametric evaluations when the conditions of homoscedastic and normalcy distribution are violated. Univariate distributions of frequencies by medians have shown that sparking-out of the high-speed plate provides the most significant decrease of median flatness deviation (up to 1.25–1.3 times), with the spark-out pass $j = 6$ for the R9M4K8 plate, and $j = 8$ for the R12F3K10M3 plate. For the R12F3K10M3 plate, the parameter R_{\max} is decreased by one categorical magnitude (CM) according to GOST 2789–73, and the parameter R_a is decreased within the CM range. For the R9M4K8 plate, the heights R_a and R_{\max} are characterized by the values 0.05 and 0.32 mcm respectively, and lie in the range of CM. The specified number of spark-out passes is also taken into consideration when the accuracy of the process is assessed.

Keywords: grinding, sparking-out, measure of position, mean, median, measure of dispersion, process stability, sintercorundum wheels, chromous.

В современном машиностроении шлифование составляет более 25 % объема трудоемкости механической обработки. При этом 70 % высокоточной обработки выполняют на шлифовальном оборудовании [1]. Благодаря высокой вязкости к сопротивлению при работе на изгиб быстрорежущие стали широко применяют в качестве материала режущей части инструментов. В промышленности все большее распространение находит сборный режущий инструмент, который по сравнению с напайными быстрорежущими пластинами (БП) имеет более высокую технологичность при эксплуатации [2, 3].

В двигателестроении, авиационной и космической технике широко применяют стали и сплавы, относящиеся к группе труднообрабатываемых. При использовании быстрорежущего инструмента для их лезвийной обработки он должен иметь повышенную твердость рабочих поверхностей и теплостойкость. Указанным требованиям в наибольшей мере удовлетворяют быстрорежущие стали, одновременно легированные ванадием, кобальтом и молибденом. Они наиболее эффективны при срезании тонких стружек развертками, зенкерами, протяжками и другими инструментами, рабочие кромки которых нагреваются до 300...500 °С [4]. Общим технологическим недостатком высоколегированных быстрорежущих сталей является пониженная обрабатываемость шлифованием.

Абразивный инструмент должен иметь высокую режущую способность, которую в первую очередь определяют макро- и микроскопическая точности поверхностей БП. При точном шлифовании ухудшение этих показателей наиболее интенсивно происходит в зонах неустановившегося резания: врезания и выхода шлифовального круга из контакта с БП [5].

В работе [6] выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на макроотклонения, точность размеров и шероховатость поверхности деталей: станок, приспособление, материал детали, режущие инструменты, технологические параметры резания, механика срезания микростружек и др.

В настоящее время разработка методов управления и контроля макро- и микрогеометрии деталей остается труднорешаемой задачей. В работе принят допуск на отклонения от плоскостности TFE для нормальной относительной геометрической точности: $TFE = 0,6T$ [7], где T — допуск на размер БП. Категориальные величины (КВ) для шероховатости назначены согласно стандарту [8].

Для повышения производительности и качества обработки деталей применяют современные технологии: *ELID*-метод, обеспечивающий наноточность; скоростное ($v_k = 40...120$ м/с), сверхскоростное ($v_k = 120...240$ м/с), ультразвуковое и лазерное шлифование, а также современные инструменты из алмаза, кубического нитрида бора (КНБ) и *SG*-абразивов; автоматическую динамическую балансировку абразивного круга (АК) непосредственно на станке; высокоточную установку прецизионных станков, исключаящую их вибрации; воздушные и гидростатические опоры шпинделей станков; высокопрочные материалы для фундамента станков и специальные комбинации конструкций сопел для подачи охлаждающей жидкости (*Coherent Jet Nozzles*, игольчатые и многоточечные) и др. [1, 9, 10].

В конце рабочего цикла по съему припуска при маятниковом шлифовании БП часто применяют выхаживание: без врезания на глубину (наиболее распространенное, принятое в иссле-

довании), замедленное или ускоренное. Использование такого технологического приема обеспечивает снижение отжаты в технологическом звене «круг–деталь» и глубины врезания отдельных зерен в металл. Это сопровождается уменьшением высот шероховатостей и разупрочнения поверхности БП, увеличением сжимающих напряжений по модулю и точности формы инструментов [11–13]. Аналогичные результаты получены в работе [14] при шлифовании быстрорежущей стали *HS6-5-2* (аналога P6M5) кругами из КНБ: выхаживание обеспечило снижение R_a до 3 раз, а сил резания в 1,6–3 раза. По данным работы [15], при шлифовании спеченного металлокерамического порошкового железа *FeGr1.2* с покрытиями *CuSn5* и *CuSn5Pb2.5* кругами из электрокорунда белого при четырех выхаживающих ходах шероховатость снизилась в 2 раза, средний шаг S_m и относительная опорная длина t_{50} увеличились соответственно в 3 и 2 раза. Следует отметить, что выхаживание ведет к снижению производительности шлифования, поэтому его необходимо проводить с минимальным числом ходов.

Вторым резервом повышения качества обработки и эффективности процесса служит абразивный инструмент, являющийся самым слабым звеном технологического процесса, поэтому ему уделяют внимание многие ученые и специалисты абразивных заводов. Признанным лидером среди производителей абразивного инструмента является *Saint-Gobian Abrasives*, в состав которого входят четыре компании: *Norton*, *Carborundum*, *Merit Abrasive* и *Winter* [10]. Компания *Norton* разработала новейшие высокопористые круги (ВПК) *Norton 3SG* и *5SG*, в которых цифры 3 и 5 соответствуют 30- и 50%-ному содержанию в смеси микрокристаллического корунда *SG*, остальное — обычный электрокорунд.

Получение зерен *SG* обеспечивает специальная технология спекания. Принципиальным отличием такого абразивного материала, называемого корундом оксида алюминия (КОА) или синтеркорундом, является строение зерен, которые состоят из субмикронных частиц размером 0,1...0,5 мкм. В результате зерна КОА изнашиваются медленно путем выкрашивания субмикронных частиц и с образованием новых острых режущих кромок без плоских площадок износа, характерных для традиционных электрокорундов. Это способствует увеличению стойкости кругов до 10 раз, хотя стоимость

операции также возрастает [1]. Благодаря наличию постоянных острых режущих кромок сокращается тепловыделение и обеспечивается отсутствие прижогов даже при интенсивных режимах шлифования. Круги из КОА позволяют увеличить глубину резания и, что особенно важно, скорость съема металла за проход без ухудшения качества обработки [16–18]. Результаты испытаний в различных производственных условиях показали повышение производительности до 6,5 раз и времени работы между правками в 4,4 раза. Круги КОА обеспечивают стабильное снижение высот микронеровностей шлифованных деталей [19].

Цель работы — установление целесообразности выхаживания БП из труднообрабатываемых марок сталей и оценка режущих способностей используемого в качестве инструмента ВПК *Norton SG* с учетом не только мер положения (средних, медиан), но и мер рассеяния. Вторая характеристика одномерного распределения частот отражает стабильность процесса шлифования, значимость которой усиливается при обработке крупных операционных партий для деталей с узкими допусками на размеры.

Методика исследования. Условия выполнения эксперимента. Шлифование проведено при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3Г71, ВПК фирмы *Norton* формы 01 с размерами 250×20×76 мм и характеристикой 5SG46K12VXP [9]; режим резания — скорость резания $v_k = 35$ м/с, продольная подача $s_{пр} = 7$ м/мин, поперечная подача $s_{п} = 1$ мм/двойной ход, глубина резания $t = 0,015$ мм; межпереходный припуск $z = 0,15$ мм; смазочно-охлаждающая жидкость — 5%-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148843-98), подаваемая поливом на заготовку с расходом 7...10 л/мин; объект исследования — образцы с размерами $D \times H = 40 \times 40$ мм, шлифуемые по торцу; повторение опытов $n = 30$ ($v = 1; 30$). Абразивный инструмент опускали на глубину t в тот промежуток времени, когда продольный стол с БП выходил из зоны резания и смещался в крайнее левое положение относительно оператора. В связи с этим прямолинейное движение стола с заготовкой слева направо принято рабочим, а обратное, выполняемое без врезания на глубину t , — холостым, окончательно формирующим топографию и точность БП. На станке ВПК сообщали вращение по часовой стрелке,

поэтому рабочий ход стола и срезание металла протекали по схеме встречного шлифования, а холостой ход — по схеме попутного. Оставшаяся часть круга по высоте в диапазоне от $(20 - s_n)$ до 1 мм неизменно работала в режиме выхаживания поверхности на протяжении всего рабочего цикла шлифования, а завершающий проход по съему металла по всей ширине БП всегда соответствовал схеме попутного шлифования. Переменные условия эксперимента представлены в виде кода « $dijv$ », который позволяет в краткой форме охарактеризовать выходные параметры процесса шлифования y_{dij} . В данном случае индекс $d = \overline{1; 2}$ отражает направление рассматриваемых высотных шероховатостей: 1 — параллельно вектору s_n , 2 — параллельно вектору s_{np} ; а $d = \overline{3; 5}$ — используемые показатели макрогеометрии; 3 — $EFE_{3ij} = EFE_{\max(ij)}$ — основной, вспомогательные; 4 — средний арифметический $EFE_{4ij} = EFE_{a(ij)}$ и 5 — средний квадратичный $EFE_{5ij} = EFE_{q(ij)}$. Код $i = \overline{1; 2}$ присвоен маркам БП: 1 — P9M4K8 (65...67 HRC); 2 — P12Ф3K10M3 (67...68 HRC). Выхаживающие ходы j представлены четными арабскими числами: 0 — без выхаживания; 2, 4, 6, 8 — отражают один-четыре двойных прохода. Высотные микронеровности $(R_a, R_{\max})_{dijv}$ измерены с помощью системы на базе профилографа-профилометра модели 252 завода «Калибр». Методика измерения и изучения отклонений от плоскостности рассмотрена в работах [20, 21].

Статистическая интерпретация экспериментальных данных. Учитывая неустойчивость процесса шлифования и случайную природу формирования поверхности БП, анализ экспериментальных случайных величин (СВ), образующих множества

$$\{y_{dij}\}, d = \overline{1; 5}, i = \overline{1; 2}, j = \overline{0; 8}, \quad (1)$$

проведем с привлечением статистических методов, разделяемых на параметрические и непараметрические, в частности ранговые. Характеристиками одномерного распределения частот для множеств (1) являются [22–24]: для первого направления — средние $\bar{y}_{dij} = y_{dij\bullet}$, стандарты отклонений $(SD)_{dij}$, размахи $R_{dij} = |y_{\max} - y_{\min}|_{dij}$; для второго направления — медианы \tilde{y}_{dij} , квартильные широты $KШ_{dij} = |y_{0,75} - y_{0,25}|_{dij}$, охватывающие 50 % множества (1). Первая частота для обеих статистик характеризует меру положения (опорное значение), а последующие — меры рассеяния

(прецизионность). При смещении \tilde{y}_{dij} относительно $y_{dij\bullet}$ кривая распределения характеризуется асимметрией (скошенностью): $As_{dij} = [3(y_{\bullet} - \tilde{y})/SD]_{dij}$, $d = \overline{1; 5}$, $i = \overline{1; 2}$, $j = \overline{0; 8}$.

Каждый метод статистики имеет «свое поле» [23] для эффективного применения в технических приложениях. В частности, для параметрического метода необходимо, чтобы все множества (1) обладали свойствами гомоскедастичности (однородности или гомогенности дисперсий отклонений) и нормальности распределений. Ранговые статистики не связаны с каким-либо семейством распределений, не используют его свойства и в условиях нарушений принятых ограничений, накладываемых на СВ множеств (1), «на своем поле» по эффективности не уступают аналогу из нормальной теории. Выбор статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних \hat{y}_{dij} или медиан $m\hat{y}_{dij}$, $d = \overline{1; 5}$, $i = \overline{1; 2}$, $j = \overline{0; 8}$ изложены в работе [22]. Процедура статистической интерпретации (1) включает в себя два последовательно выполняемых этапа: одномерный дисперсионный анализ (ОДА) для выявления значимого различия между уровнями мер положения и их множественный анализ, завершающийся поиском ожидаемых аналогов. Обработка (1) связана с большим объемом вычислений, поэтому проведена в программной среде *Statistica 6.1.478.0*.

Влияние непараметрического метода на положение мер положения оцениваем медианными коэффициентами при одноименных $d = \overline{1; 5}$, $i = \overline{1; 2}$, $j = \overline{0; 8}$:

$$K_{M\ dij} = (\tilde{y}/y_{\bullet})_{dij}; \quad (2)$$

$$\hat{K}_{M\ dij} = (m\hat{y}/\hat{y}_{\bullet})_{dij}. \quad (3)$$

В целом (2), (3) позволяют выявить эффективность непараметрического метода статистики в условиях нарушения гомоскедастичности и нормальности распределений (1) и целесообразность множественного анализа мер положения. Все это обеспечивает более адекватную оценку влияния выхаживания на выходные параметры процесса шлифования:

$$K_{dij} = (m\hat{y}_j/m\hat{y}_{j=0})_{di}, j = \overline{2; 8}. \quad (4)$$

Вторым фактором, характеризующим эффективность абразивной обработки, служит стабильность (прецизионность), которая обеспечивает сохранение выходных показателей процесса на квазипостоянном высоком уровне на протяжении всего времени шлифования

операционной партии без правки и поднастройки станка [25]. Для анализа прецизионности процесса шлифования на этапе выхаживания использованы результаты исследования, приведенные в работе [26], которые позволили получить коэффициенты стабильности процесса ($p = 1; 3$) [27] при $j = 2; 8$:

$$K_{ст\ dij1} = (SD_{j=0} / SD_j)_{di}; \tag{5}$$

$$K_{ст\ dij2} = (R_{j=0} / R_j)_{di}; \tag{6}$$

$$K_{ст\ dij3} = (KШ_{j=0} / KШ_j)_{di}. \tag{7}$$

Результаты исследования. Выбор статистического метода интерпретации множеств (1). В табл. 1 и 2 приведены результаты проверки множеств (1) на однородность дисперсий и

нормальность распределений, которые завершаются принятием нуль-гипотез (H_0) или их отклонением (принятием альтернативных гипотез H_1). Учитывая важность обеспечения гомогенности дисперсий и вероятностный характер принимаемых решений, проверку H_0 провели с привлечением трех групп статистик ($m = 1; 3$): 1 — Левене; 2 — Хартли, Кохрена и Бартлетта (в программе представлены одной совокупностью); 3 — Брауна-Форсайта. Окончательное решение о принятии H_0 должно удовлетворять требованию, при котором количество решений f_0 в ее пользу находят из выражения $f_0 \in [2; 3]$. В табл. 1 знак «+» соответствует требованию $f_0 = 3$, а знак «+×» — $f_0 = 2$. Таким образом, для большинства параметров качества (7 из 10) дисперсии отклонений характеризуют

Таблица 1

Проверка множеств (1) на гомоскедастичность при $\alpha_{mdij} < 0,05$

БП	Параметр	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	H_0
Р9М4К8 ($i = 1$)	R_{a1j}	0,0250	0,0001	0,1684	+×
	R_{max1j}	0,0063	0,0001	0,0865	+×
	EFE_{max1j}	0,0303	0,2396	0,1555	–
	EFE_{a1j}	0,1569	0,3163	0,0937	–
	EFE_{q1j}	0,3402	0,3102	0,2945	–
Р12Ф3К10М3 ($i = 2$)	R_{a2j}	0,0001	0,0000	0,0280	+
	R_{max2j}	0,0124	0,0001	0,0568	+×
	EFE_{max2j}	0,0001	0,0001	0,0001	+
	EFE_{a2j}	0,0001	0,0001	0,0001	+
	EFE_{q2j}	0,0000	0,0000	0,0000	+

Таблица 2

Проверка множеств (1) на нормальность распределений при $\alpha_{dij} > 0,5$

БП	$j = \overline{0; 8}$	R_{a1ij}	R_{max1ij}	EFE_{maxij}	EFE_{a1ij}	EFE_{q1ij}
Р9М4К8 ($i = 1$)	0	0,014	0,076	0,0826	<u>0,802</u>	<u>0,718</u>
	2	0,108	<u>0,509</u>	0,0041	0,072	0,110
	4	0,004	0,001	0,0356	0,093	0,050
	6	0,000	0,000	0,0481	0,071	0,141
	8	0,000	0,011	0,0062	0,004	0,029
Р12Ф3К10М3 ($i = 2$)	0	0,000	0,004	0,0420	0,383	0,037
	2	0,000	0,001	0,4070	<u>0,672</u>	0,289
	4	0,000	0,078	0,5000	0,045	0,030
	6	0,000	0,005	0,0090	0,384	<u>0,571</u>
	8	0,001	0,000	0,0660	<u>0,672</u>	0,493

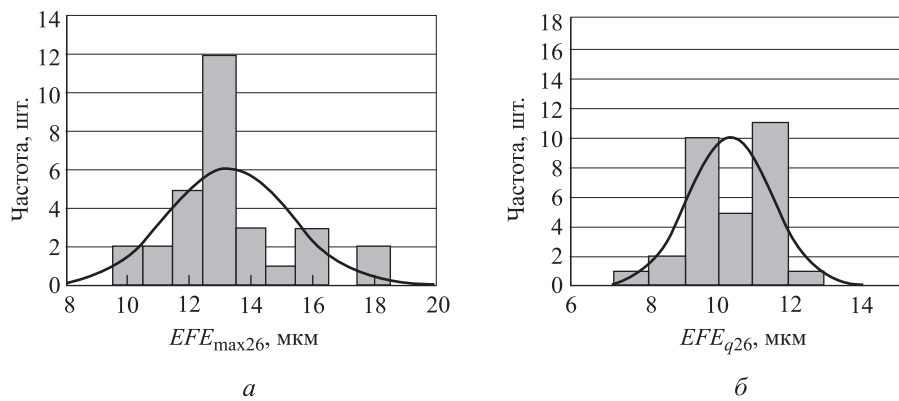


Рис. 1. Гистограммы качества с наложением кривых нормального распределения для параметров $EFE_{\max 26}$ (а) и EFE_{q26} (б) при числе $j = 6$

ся случайным рассеянием наблюдений, т. е. однородны.

Проверка множеств (1) на нормальность распределений проведена по критерию Шапиро — Уилка. В табл. 2 такие распределения подчеркнуты. По результатам тестирования установлено, что H_0 приняты только в шести случаях из 50. Одна из таких ситуаций, полученная при шлифовании БП Р12Ф3К10М3 для параметров $EFE_{\max 26}$ (уровень значимости $\alpha = 0,09$) и EFE_{q26} ($\alpha = 0,571$), приведена соответственно на рис. 1, а и б. Следует отметить, что одни и те же множества (1), просуммированные различными методами, показали неодинаковые распределения СВ. Из теоретической статистики известно, что параметрические методы устойчивы, т. е. робастны, при «умеренных отклонениях» (1) от кривой Гаусса [22]. Однако умеренность отклонений наблюдений нигде не регламентирована, поэтому для повышения точности интерпретации экспериментальных данных выбран непараметрический метод. Приводимые параллельно результаты его аналога из нормальной теории служат скорее для подтверждения их неадекватности «на чужом поле».

Оценка эффективности выхаживания ВПК 5SG46 по опорным значениям. Результаты исследования показали, что корреляционные коэффициенты между поперечными ($d = 1$) и продольными ($d = 2$) высотными параметрами шероховатости при одноименных $j = 0; 8$ предсказаны в диапазонах $\tilde{y}_{1j}/\tilde{y}_{2j}$: 1,92...3,5 для БП Р9М4К8 и 1,33...2,08 для БП Р12Ф3К10М3. Изложенное предопределило то, что высотные шероховатости в поперечном направлении регламентируют эксплуатационные свойства БП. В связи с этим при оценке влияния числа выхаживаний на опытные и ожидаемые меры поло-

жения параметров шероховатости и коэффициенты (2)–(4) их следует учитывать в первую очередь (табл. 3). В скобках в табл. 3 приведены КВ [8]. Аналогичные результаты по отклонениям от плоскостности содержатся в табл. 4, в которой в скобках указаны допуски TFE [7]. Меры положения для обоих выходных параметров процесса проанализируем с позиций статистики и технологии шлифования БП.

С позиции статистики рассмотрим возможные вариации мер положения по опытным и прогнозируемым средним и медианам. При этом исходим из того, что качество шлифованных БП повышается, если распределения (1) характеризуются положительной скошенностью. В этом случае имеют место неравенства следующего вида: $(\tilde{y} < y \cdot)_{dij}$ или $(m\hat{y} < \hat{y})_{dij}$ при одноименных $d = 1; 3; 5$, i, j . Таким образом, полученные медианы оказываются меньше своих аналогов из нормальной теории, что повышает качество шлифованных БП.

Отмеченная закономерность наиболее значимо проявилась для параметра микрорельефа $R_{\max 1j}$, $i = 1; 2$, $j = 0; 8$ для всех БП и в большинстве случаев шлифования наблюдалась внутри одной КВ. При этом для параметра $R_{\max 1j}$ все коэффициенты (2), (3) имели значения меньше 1,0.

Аналогичные результаты получены при исследовании точности формы БП. В табл. 4 представлено по 30 показателей отклонений от плоскостности по медианам и коэффициентам (2) и (3). Количество опытных коэффициентов (2), имевших значения меньше 1,0, составило 19, а для прогнозируемых коэффициентов (3) — 22. В обоих случаях такие ситуации сложились более чем у половины переменных шлифования. Полученные результаты возможны при смещении медиан левее центра распре-

Таблица 3

Влияние выхаживания ВПК 5SG46 на меры положения шероховатостей и коэффициенты (2)–(4)

БП	Параметр	j	y_* , мкм	\hat{y}_* , мкм	\tilde{y} , мкм	$m\hat{y}$, мкм	$K_{m\ 1ij}$ (2)	$\hat{K}_{m\ 1ij}$ (3)	K_{1ij} (4)
Р9М4К8 ($i = 1$)	R_{a11j}	0	0,047 (0,050)	0,047 (0,050)	0,05 (0,050)	0,045 (0,050)	1,06	0,96	1,00
		2	0,058 (0,063)	0,053 (0,063)	0,06 (0,063)	0,050 (0,050)	1,03	0,94	1,11
		4	0,050 (0,050)	0,049 (0,050)	0,05 (0,050)	0,045 (0,050)	1,00	0,92	1,00
		6	0,046 (0,050)	0,047 (0,050)	0,04 (0,040)	0,042 (0,050)	0,87	0,89	0,93
		8	0,041 (0,050)	0,046 (0,050)	0,04 (0,040)	0,042 (0,050)	0,98	0,91	0,93
	R_{max11j}	0	0,319 (0,320)	0,321 (0,400)	0,31 (0,320)	0,302 (0,320)	0,97	0,94	1,00
		2	0,362 (0,400)	0,338 (0,400)	0,36 (0,400)	0,334 (0,400)	0,99	0,99	1,11
		4	0,355 (0,400)	0,334 (0,400)	0,34 (0,400)	0,312 (0,320)	0,96	0,93	1,03
		6	0,303 (0,320)	0,317 (0,320)	0,25 (0,250)	0,287 (0,320)	0,83	0,91	0,95
		8	0,267 (0,320)	0,296 (0,320)	0,26 (0,320)	0,271 (0,320)	0,97	0,92	0,90
Р12Ф3К10М3 ($i = 2$)	R_{a12j}	0	0,047 (0,050)	0,045 (0,050)	0,04 (0,040)	0,038 (0,040)	0,85	0,84	1,00
		2	0,040 (0,040)	0,038 (0,040)	0,04 (0,040)	0,037 (0,040)	1,00	0,97	0,97
		4	0,036 (0,040)	0,037 (0,040)	0,03 (0,032)	0,037 (0,040)	0,83	1,00	0,97
		6	0,034 (0,040)	0,036 (0,040)	0,03 (0,032)	0,036 (0,040)	0,88	1,00	0,95
		8	0,036 (0,040)	0,037 (0,040)	0,04 (0,040)	0,037 (0,040)	1,11	1,00	0,90
	R_{max12j}	0	0,302 (0,320)	0,280 (0,320)	0,27 (0,320)	0,253 (0,320)	0,89	0,90	1,00
		2	0,273 (0,320)	0,260 (0,320)	0,26 (0,320)	0,239 (0,250)	0,95	0,92	0,94
		4	0,235 (0,250)	0,250 (0,250)	0,21 (0,250)	0,231 (0,250)	0,89	0,92	0,91
		6	0,235 (0,250)	0,250 (0,250)	0,22 (0,250)	0,231 (0,250)	0,94	0,92	0,91
		8	0,259 (0,320)	0,257 (0,320)	0,24 (0,250)	0,239 (0,250)	0,93	0,93	0,94

Примечание. В скобках приведены КВ [8].

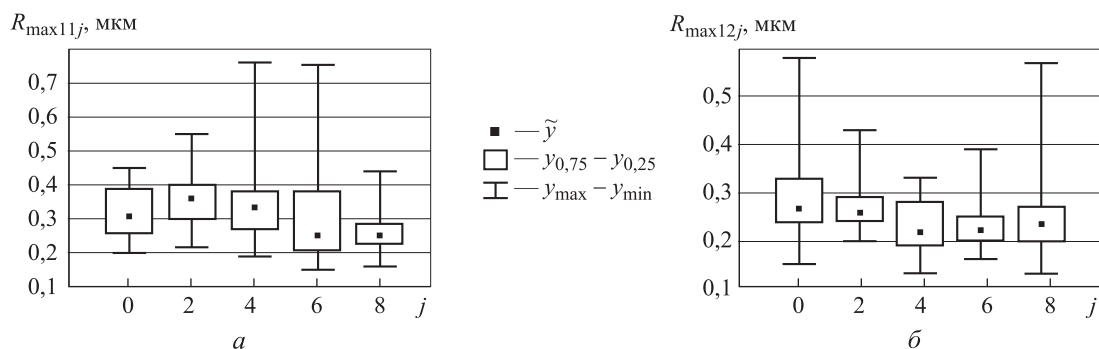


Рис. 2. Влияние выхаживающих ходов на одномерные распределения частот параметра R_{max1ij} для БП Р9М4К8 (а) и Р12Ф3К10М3 (б) при непараметрическом методе исследования

лений (1). Поскольку окончательное решение по мерам положения следует принимать по ожидаемым $m\hat{y}_{dij}$, \hat{y}_{dij} , $d = 3; 5$, $i = 1; 2$, $j = 0; 8$, рассмотрим медианные коэффициенты (3). Из всех коэффициентов, оказавшихся меньше 1,0, только в одном случае снижение $m\hat{E}\hat{F}E_{320}$ от-

носительно $E\hat{F}E_{320}$ предсказано на один квартал точности. В остальных случаях оно не вышло за пределы качества точности. Различия между коэффициентами (2) и (3), приведенными в табл. 3, 4, дополнительно свидетельствуют о целесообразности проведения

Таблица 4

Влияние ВПК 5SG46 на меры положения отклонений от плоскостности и коэффициенты (2)–(4)

БП	Параметр	j	y_{\bullet} , мкм	\hat{y}_{\bullet} , мкм	\hat{y} , мкм	$m\hat{y}$, мкм	K_{mdij} (2)	\hat{K}_{mdij} (3)	K_{dij} (4)
P9M4K8 ($i = 1$)	EFE_{max1j} (EFE_{31j})	0	15,27 (7)	14,71 (7)	15,50 (7)	14,50 (7)	1,02	0,99	1,00
		2	14,53 (7)	14,71 (7)	14,00 (7)	14,50 (7)	0,96	0,99	1,00
		4	14,33 (7)	14,66 (7)	14,00 (7)	14,50 (7)	0,98	0,99	1,00
		6	12,47 (7)	12,35 (7)	12,00 (7)	11,00 (7)	0,96	0,89	0,76
		8	11,07 (7)	11,18 (7)	10,00 (7)	11,00 (7)	0,90	0,98	0,76
	EFE_{a1j} (EFE_{41j})	0	11,38 (7)	11,00 (7)	11,38 (7)	10,86 (7)	1,00	0,99	1,00
		2	10,89 (7)	11,00 (7)	10,50 (7)	10,86 (7)	0,96	0,99	1,00
		4	10,73 (7)	11,00 (7)	10,71 (7)	10,42 (7)	1,00	0,95	0,96
		6	9,48 (6)	9,48 (6)	9,08 (6)	9,14 (6)	0,96	0,96	0,84
		8	7,66 (6)	7,66 (6)	7,63 (6)	8,35 (6)	1,00	1,09	0,77
	EFE_{q1j} (EFE_{51j})	0	11,67 (7)	11,32 (7)	11,84 (7)	11,17 (7)	1,01	0,99	1,00
		2	11,24 (7)	11,32 (7)	10,76 (7)	11,17 (7)	0,96	0,99	1,00
		4	11,04 (7)	11,32 (7)	10,91 (7)	11,17 (7)	0,99	0,99	1,00
		6	9,69 (6)	9,69 (6)	9,39 (6)	8,67 (6)	0,97	0,89	0,78
		8	8,02 (6)	8,02 (6)	7,95 (6)	8,67 (6)	0,99	1,08	0,78
P12Ф3К10М3 ($i = 2$)	EFE_{max2j} (EFE_{32j})	0	16,47 (8)	16,11 (8)	16,00 (8)	15,67 (7)	0,97	0,97	1,00
		2	16,23 (8)	15,99 (7)	16,00 (8)	15,67 (7)	0,99	0,98	1,00
		4	15,27 (7)	15,91 (7)	15,00 (7)	15,67 (7)	0,98	0,98	1,00
		6	13,30 (7)	12,85 (7)	13,00 (7)	12,50 (7)	0,98	0,97	0,80
		8	12,40 (7)	12,85 (7)	12,00 (7)	12,50 (7)	0,97	0,97	0,80
	EFE_{a2j} (EFE_{42j})	0	11,52 (7)	11,25 (7)	11,25 (7)	11,08 (7)	0,98	0,98	1,00
		2	10,98 (7)	11,08 (7)	10,92 (7)	10,54 (7)	0,99	0,95	0,96
		4	9,93 (6)	10,04 (7)	10,00 (7)	10,31 (7)	1,01	1,03	0,93
		6	10,05 (6)	10,10 (7)	10,00 (7)	10,31 (7)	0,99	1,02	0,93
		8	8,66 (6)	8,66 (6)	8,66 (6)	8,67 (6)	1,00	1,00	0,78
	EFE_{q2j} (EFE_{52j})	0	12,02 (7)	11,81 (7)	12,05 (7)	11,39 (7)	1,00	0,96	1,00
		2	11,61 (7)	11,74 (7)	11,50 (7)	11,39 (7)	0,99	0,97	1,00
		4	10,58 (7)	10,52 (7)	10,62 (7)	11,14 (7)	1,00	1,06	0,98
		6	10,32 (7)	10,45 (7)	10,38 (7)	10,50 (7)	1,01	1,00	0,92
		8	8,96 (6)	8,96 (6)	8,95 (6)	8,95 (6)	1,00	1,00	0,79

Примечание. В скобках приведены допуски TFE [7].

второго этапа ОДА с поиском ожидаемых мер положения.

С позиции технологии шлифования определим влияние выхаживания на топографию поверхности и уточним оптимальное число двойных продольных ходов j . Как видно из табл. 3 и

рис. 2, шероховатость снижается практически во всех случаях выхаживания в пределах КВ, о чем свидетельствуют коэффициенты (4), варьируемые от 1,00 ($j = 0$) до 0,9 ($j = 8$). Приведенные в работе [14] результаты исследования о трехкратном снижении параметра R_{a1} при выхаживании

вании не подтверждены. Более эффективным оказалось выхаживание для повышения точности формы БП.

Как видно из табл. 4 и рис. 3, выхаживание снижает все три показателя отклонений от плоскостности EFE_{dij} , $d = 3; 5$, $i = 1; 2$, $j = 0; 8$. Однако для наибольшего показателя EFE_{max} отмеченная закономерность наблюдается внутри одного $TFE7$, а для вспомогательных показателей эффективность выхаживания усиливается и оценивается повышением точности формы БП на один квалитет, т. е. $TFE6$ при $j = 6; 8$ для стали Р9М4К8 и при $j = 8$ для стали Р12Ф3К10М3.

Установлено, что выхаживание наиболее эффективно при шлифовании БП Р12Ф3К10М3 и позволяет повысить их качество поверхности по шероховатостям на одну КВ, а по точности формы основного показателя — на один TFE . Это обусловлено более низкой шлифуемостью указанной стали по сравнению с Р9М4К8 при работе с $j = 0$.

Сравнение режущих способностей ВПК 5SG46 и АК с хромистым электрокорундом нормальной пористости по мерам положения. Сравним режущие способности ВПК 5SG46 и АК 34AF60K6V5 нормальной пористости, в котором абразивные зерна представлены хромистым электрокорундом 34AF60. Легирование электрокорунда окисью хрома ведет к упрочнению кристаллической решетки окиси алюминия, что придает зерну повышенную вязкость и абразивную способность. Это позволяет применять 34AF60 на интенсивных режимах шлифования легированных сталей, склонных к прижомам в закаленном состоянии [28]. Следует отметить, что ВПК 5SG46 и АК 34AF60 различаются не только по абразивным зернам, но и по зернистости, структуре и связке. При этом у АК 34AF60 по сравнению с ВПК

5SG46 зерна мельче на одну основную фракцию. Но обе характеристики инструмента в представленном виде применяются при шлифовании БП. В табл. 5 приведены меры положения и рассеяния для непараметрического метода, полученные на режиме шлифования, приведенном в методике эксперимента при $j = 0$. В скобках при шероховатостях приведены КВ [8], при отклонениях от плоскостности — квалитеты точности [7]. Меры положения и рассеяния для АК 34AF60 выбраны по данным работ [27, 29].

Представленные результаты свидетельствуют о том, что круги КОА в наибольшей мере превосходят АК 34AF60 по снижению шероховатостей шлифованных БП. Их преимущества перед АК из хромистого электрокорунда усиливаются с ухудшением шлифуемости быстрорежущей стали. При шлифовании БП Р9М4К8 меры положения уменьшились в 1,12...1,14 раза по опытным медианам \tilde{y} и в 1,27–1,38 раза по ожидаемым $t\tilde{y}$ (или на одну КВ). При шлифовании БП Р12Ф3К10М3 отмеченная закономерность усиливается до двух КВ или в 1,9–2,1 раза по опытным и прогнозируемым медианам. При этом все медианы находятся в пределах допуска $TFE7$ (см. табл. 5), и только при шлифовании БП Р9М4К8 кругами 34AF60 точность формы по основному показателю EFE_{max} снижается до $TFE8$.

Оценка стабильности процесса на этапе выхаживания БП. В табл. 6 и на рис. 2, 3 приведены меры рассеяния и коэффициенты стабильности (5)–(7). В условиях приоритетного использования непараметрического метода прецизионность определяем по КШ и коэффициенту (7). В табл. 6 также представлены параметрические характеристики рассеяния, позволяющие оценить их несостоятельность исполь-

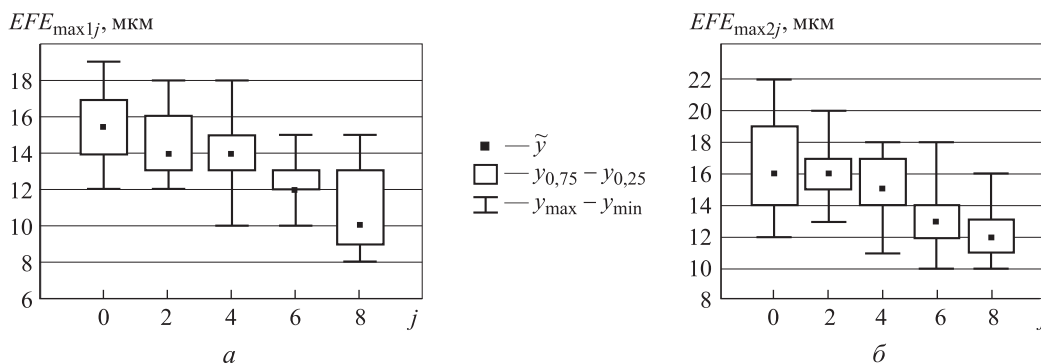


Рис. 3. Влияние выхаживающих ходов на одномерные распределения частот параметра $EFE_{max ij}$ для БП Р9М4К8 (а) и Р12Ф3К10М3 (б) при непараметрическом методе исследования

Таблица 5

Сравнение режущих способностей ВПК 5SG46 и АК 34AF60 по мерам положения и рассеяния при шлифовании БП без выхаживания

БП	Параметр	Круг	\bar{y} , мкм	$m\hat{y}$, мкм	КШ, мкм	
Р9М4К8 ($i = 1$)	R_{a1}	5SG46	0,050 (0,050)	0,045 (0,050)	0,02	
		34AF60	0,057 (0,063)	0,062 (0,063)	0,02	
	R_{max1}	5SG46	0,310 (0,320)	0,302 (0,320)	0,13	
		34AF60	0,347 (0,400)	0,384 (0,400)	0,09	
	EFE_{max}	5SG46	15,500 (TFE7)	14,500 (TFE7)	3,00	
		34AF60	17,000 (TFE8)	17,000 (TFE8)	4,00	
	EFE_a	5SG46	11,380 (TFE7)	10,860 (TFE7)	2,00	
		34AF60	12,460 (TFE7)	12,740 (TFE7)	2,75	
	EFE_q	5SG46	11,840 (TFE7)	11,170 (TFE7)	1,14	
		34AF60	13,180 (TFE7)	12,840 (TFE7)	2,70	
	Р12Ф3К10М3 ($i = 2$)	R_{a1}	5SG46	0,040 (0,040)	0,038 (0,040)	0,01
			34AF60	0,078 (0,080)	0,078 (0,080)	0,03
R_{max1}		5SG46	0,270 (0,320)	0,253 (0,320)	0,09	
		34AF60	0,511 (0,630)	0,539 (0,630)	0,19	
EFE_{max}		5SG46	16,000 (TFE7)	15,670 (TFE7)	5,00	
		34AF60	16,000 (TFE7)	16,000 (TFE7)	2,00	
EFE_a		5SG46	11,250 (TFE7)	11,080 (TFE7)	2,67	
		34AF60	11,290 (TFE7)	11,770 (TFE7)	1,83	
EFE_q		5SG46	12,050 (TFE7)	11,390 (TFE7)	2,96	
		34AF60	11,720 (TFE7)	12,200 (TFE7)	2,07	

Примечание. В скобках при шероховатостях приведены КВ [8], при отклонениях от плоскостности — качества точности [7].

зования «на чужом поле». Рассмотрим меры рассеяния для двух параметров качества БП: R_{max1ij} и EFE_{qij} , $i = 1; 2$, $j = 0; 8$. Среднеквадратичный показатель отклонений от плоскостности выбран исходя из того, что модель точности шлифования имеет случайный характер, а параметр R_{max1ij} оказался более коррелированным с процессом выхаживания по опорным значениям.

Анализ квартильных широт при переменном $j = 0; 8$ показал, что по сравнению с медианами данная частота одномерного распределения (1) характеризуется большим рассеянием. Тем не менее, можно утверждать, что по квартильным широтам для обоих рассматриваемых параметров качества поверхности БП отмечена закономерность повышения прецизионности процесса с ростом числа выхаживающих ходов. Она с некоторым разбросом подтверждает рост

коэффициентов стабильности (7). Параметрические коэффициенты (5), (6) по $(SD, R)_{dij}$ совпали с непараметрическими (7) на качественном уровне только для БП Р12Ф3К10М3, под которым подразумеваем идентичный характер выявленной закономерности. Для БП Р9М4К8 в идентичных условиях отмечен рост мер рассеяния, особенно для шероховатостей (в 2 раза и более), что свидетельствует об их неадекватности и опасности получения неверного решения при использовании «на чужом поле».

Вопрос об оптимальном количестве выхаживающих ходов следует решать с учетом снижения мер рассеяния и минимального роста трудоемкости шлифовальной операции. С этих позиций наилучшие результаты обеспечивает выхаживание с одним двойным проходом ($j = 2$). В данном случае происходит снижение: КШ в 1,75–1,8 раза для БП Р12Ф3К10М3; шеро-

ховатостей $R_{\max112}$ в 1,3 раза и EFE_{q12} в 2 раза для БП Р9М4К8. Следует отметить, что выхаживание — сложный технологический прием, который требует индивидуального подхода при шлифовании каждой конкретной детали.

Оценка стабильности процесса при шлифовании БП кругами 5SG46 и 34AF60 без выхаживания. Как видно из табл. 5, стабильность процесса при шлифовании ВПК 5SG46 и АК 34AF60 зависит от марки быстрорежущей стали и параметра оптимизации. Для снижения мер рассеяния по КШ для показателя EFE_{5ij} шлифование БП Р9М4К8 следует проводить кругами КОА, которые по сравнению с АК 34А обеспечивают повышение стабильности шлифования в 1,3–2,4 раза. При этом по сравнению с ВПК 5SG46 абразивные круги 34AF60 обеспечивают снижение КШ для параметров точности формы

БП Р12Ф3К10М3 в 1,3–1,4 раза. По шероховатостям наибольшее различие по КШ выявлено при шлифовании БП Р12Ф3К10М3: по сравнению с кругами из хромистового электрокорунда ВПК 5SG46 обеспечили снижение мер рассеяния по КШ в 2–3 раза. При этом КШ оказался менее робастной характеристикой для СВ по сравнению с мерой положения. В частности, при шлифовании БП Р9М4К8 наилучшую прецизионность процесса (до 1,4 раз) по КШ для $R_{\max11}$ проявил АК 34AF60. По параметру R_{q11} оба инструмента предсказали одинаковую стабильность формирования поверхности. Неоднозначное влияние режущих способностей ВПК 5SG46 и АК 34AF60 на стабильность процесса формирования шероховатости и отклонений от плоскостности при шлифовании БП Р9М4К8 и Р12Ф3К10М3 затрудняет их выбор

Таблица 6

Влияние выхаживания ВПК 5SG46 на прецизионность процесса и коэффициенты стабильности (5)–(7)

БП	Параметр	Мера рассеяния, мкм $K_{ст\ ij}$	Число выхаживаний j				
			0	2	4	6	8
Р9М4К8 ($i = 1$)	$R_{\max11j}$	$\frac{SD}{(5)}$	$\frac{0,07}{1,00}$	$\frac{0,08}{0,84}$	$\frac{0,13}{0,53}$	$\frac{0,14}{0,50}$	$\frac{0,07}{1,00}$
		$\frac{R}{(6)}$	$\frac{0,25}{1,00}$	$\frac{0,33}{0,76}$	$\frac{0,57}{0,44}$	$\frac{0,60}{0,42}$	$\frac{0,28}{0,89}$
		$\frac{КШ}{(7)}$	$\frac{0,13}{1,00}$	$\frac{0,10}{1,30}$	$\frac{0,11}{1,18}$	$\frac{0,17}{0,76}$	$\frac{0,06}{2,17}$
	EFE_{q1j} (EFE_{51j})	$\frac{SD}{(5)}$	$\frac{1,32}{1,00}$	$\frac{1,40}{0,94}$	$\frac{1,38}{0,76}$	$\frac{1,48}{0,89}$	$\frac{1,69}{0,78}$
		$\frac{R}{(6)}$	$\frac{4,81}{1,00}$	$\frac{5,51}{0,87}$	$\frac{7,67}{0,63}$	$\frac{5,94}{0,81}$	$\frac{6,33}{0,76}$
		$\frac{КШ}{(7)}$	$\frac{1,14}{1,00}$	$\frac{0,57}{1,99}$	$\frac{0,72}{1,59}$	$\frac{0,64}{1,77}$	$\frac{1,09}{1,04}$
Р12Ф3К10М3 ($i = 2$)	$R_{\max12j}$	$\frac{SD}{(5)}$	$\frac{0,10}{1,00}$	$\frac{0,06}{1,78}$	$\frac{0,05}{2,00}$	$\frac{0,05}{2,00}$	$\frac{0,09}{1,11}$
		$\frac{R}{(6)}$	$\frac{0,43}{1,00}$	$\frac{0,23}{1,87}$	$\frac{0,20}{2,15}$	$\frac{0,23}{1,87}$	$\frac{0,44}{0,98}$
		$\frac{КШ}{(7)}$	$\frac{0,09}{1,00}$	$\frac{0,05}{1,80}$	$\frac{0,09}{1,00}$	$\frac{0,05}{1,80}$	$\frac{0,07}{1,29}$
	EFE_{q2j} (EFE_{52j})	$\frac{SD}{(5)}$	$\frac{1,99}{1,00}$	$\frac{1,06}{1,88}$	$\frac{1,10}{1,81}$	$\frac{1,18}{1,68}$	$\frac{1,07}{1,86}$
		$\frac{R}{(6)}$	$\frac{6,49}{1,00}$	$\frac{3,70}{1,75}$	$\frac{5,22}{1,24}$	$\frac{5,04}{1,29}$	$\frac{5,00}{1,30}$
		$\frac{КШ}{(7)}$	$\frac{2,86}{1,00}$	$\frac{1,69}{1,75}$	$\frac{0,99}{3,22}$	$\frac{1,92}{1,54}$	$\frac{1,20}{2,47}$

Примечание. В числителе приведены меры рассеяния: SD — стандарты отклонений, R — размахи, КШ — квартильные широты; в знаменателе — коэффициенты стабильности (5)–(7).

при робастном проектировании шлифовальных операций и требует четких представлений об управлении тем или иным параметром качества поверхности БП, который в данном случае должен быть принят приоритетным.

Выводы

1. В условиях нарушений нормальности распределений показана целесообразность привлечения непараметрических статистик, которые базируются на медианах и квартильных широтах, отражающих соответственно меры положения и рассеяния.

2. Установлено, что выхаживание БП обеспечивает наиболее значимое снижение медиан отклонений от плоскостности (до 1,25–1,3 раз) при числе ходов: $j = 6$ для БП Р9М4К8 и $j = 8$ для БП Р12Ф3К10М3. При этом параметр $R_{\max 128}$ снижается на одну КВ для БП Р12Ф3К10М3 и в пределах КВ для параметра R_{a128} . Для БП Р9М4К8 высоты R_{a116} и $R_{\max 116}$ уменьшаются соответственно до 0,05 и 0,32 мкм в КВ.

3. Для наилучшей стабилизации процесса по параметрам R_{a1} и $R_{\max 1}$ достаточно одного выхаживающего хода ($j = 2$).

4. Выявлено, что по сравнению с АК 34А круги 5SG46 обеспечивают большее уменьше-

ние высот шероховатостей. Наибольший эффект по шероховатости достигнут в пределах двух–трех КВ для наиболее трудношлифуемых БП Р12Ф3К10М3. Для БП Р9М4К8 он снизился до одной КВ. Относительно отклонений от плоскостности предсказано их уменьшение в пределах одного квалитета точности.

5. Установлено, что по стабильности процесса ВПК из синтеркорунда превосходят АК из хромистого электрокорунда: по точности формы в 1,3–1,4 раза для БП Р9М4К8; по шероховатостям R_{a1} и $R_{\max 1}$ в 2–3 раза для БП Р12Ф3К10М3. При этом АК 34А показали повышение стабильности формирования макротклонений в 1,3–1,5 раза относительно ВПК 5SG46, а также лучшую воспроизводимость процесса при шлифовании БП Р9М4К8 для наибольшей высоты микронеровностей.

6. Различное влияние режущих способностей ВПК из синтеркорунда и АК из хромистого электрокорунда на меры положения и рассеяния шероховатостей и отклонений от плоскостности затрудняет робастное проектирование шлифовальных операций. Для повышения его эффективности следует ограничивать требуемое количество целевых функций.

Литература

- [1] Пилинский А.В. Инновационные методы и вызовы в скоростном и сверхскоростном шлифовании. *Вектор науки ТГУ*, 2015, № 2 (32-2), с. 136–144.
- [2] Зубарев Ю.М. Современное состояние и перспективы развития инструментального производства. *Справочник. Инженерный журнал (с приложением)*, 2013, № 3, с. 29–34.
- [3] Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л., Гречишников В.А., Киселёв А.С. *Металло-режущие инструменты*. Москва, Машиностроение, 1989. 328 с.
- [4] Геллер Ю.А. *Инструментальные стали*. Москва, Металлургия, 1983. 527 с.
- [5] Gusseinor G.A., Bagirov S.A. Main feature of the mechanism of formation the surface grinding with periphery of straight disk. *International journal of Advances in Engineering & Technology*, 2014, vol. 7 (1), pp. 66–74.
- [6] Kundrak J., Bana V. Size, form and position accuracy in machining of case hardened steels. *Proc. on the DMC 2002, Conference*, Kosice, Slovakia, 22-23rd May 2002, pp. 41–46.
- [7] ГОСТ 24643–81. *Допуски формы и расположения поверхностей*. Числовые значения. Москва, Изд-во стандартов, 1981. 14 с.
- [8] ГОСТ 2789–73. *Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения*. Москва, Изд-во стандартов, 1985. 10 с.
- [9] Sachsel H.G. *Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive and Superabrasive*. USA, Xlibris Corp., 2010. 680 p.
- [10] Webster J., Tricard M. Innovation in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2004, vol. 53 (2), pp. 597–617.
- [11] Армер А.И. *Повышение эффективности плоского маятникового шлифования путем ускоренного выхаживания с применением устройств для микроподачи заготовок*. Дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2012. 208 с.

- [12] Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. *Технология шлифования в машиностроении*. Санкт-Петербург, Политехника, 2007. 424 с.
- [13] Лурье Г.Б. *Шлифование металлов*. Москва, Машиностроение, 1969. 172 с.
- [14] Urbaniak M. Effect of the conditionings of CBN wheels on the technological results of HS6-5-2 steel grinding. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2006, vol. VI, № 2, pp. 31–39.
- [15] Feldshtein E., Dyachkova D. Surface texture of sintered iron-graphite MMCs infiltrated by copper alloys after grinding. *Advances in manufacturing science and technology*, 2013, vol. 37 (2), pp. 69–76
- [16] Молчанов С.А., Могиленский В.И., Каплан Ф.С. Новый абразивный инструмент на основе спеченного оксида алюминия. *Станки и инструмент*, 1991, № 3, с. 39–40.
- [17] Bonner A., Bright E., Lambert E.L., Matsumoto D.S., Orhac X., Sheldon D.A. *Abrasive Articles with Novel Structures and Methods of Grinding*. Pat. 7275980 US. Saint-Gobain Abrasive Technology Company, 2003.
- [18] Wu M. *Method for Making High Permeability Grinding Wheels*. Pat. 5738696 US. Norton Company, 1998.
- [19] Lindsay R.P. The performance of seeded gel abrasive in the laboratory and at customer test sites. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1989, vol. 61 (10), pp. 20–26.
- [20] Солер Я.И., Лгалов В.В., Стрелков А.Б. Оценка режущих свойств абразивных кругов различной пористости по критерию формы плоских деталей штампов X12. *Металлообработка*, 2012, № 1 (67), с. 5–10.
- [21] Солер Я.И., Нгуен В.К. Прогнозирование эффективности шлифования кругами различной пористости из традиционных и новых абразивов по критерию точности формы пластин Р9М4К8. *Вестник ИргТУ*, 2014, № 11 (94), с. 49–58.
- [22] Клячкин В.Н. *Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии*. Москва, Финансы и статистика, ИНФРА-М, 2009. 304 с.
- [23] Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. New York, Willy-Interscience, 1999. 787 p.
- [24] ГОСТ Р ИСО 5726–2002. *Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерения. Ч. 1.: Основные понятия и определения*. Москва, Изд-во стандартов, 2002. 24 с.
- [25] Доброскок В.Л. *Повышение стабильности процесса шлифования путем управления рельефом рабочей поверхности алмазных кругов*: Дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1986. 253 с.
- [26] Soler Ya. I., Nguyen Van Canh. The influence of sparking-out on formation stability of micro- and macro geometry high-speed plates in pendulum grinding by sinterkorund. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 2015, vol. 1-2, pp. 58–63.
- [27] Солер Я.И., Нгуен В.К. Макрогеометрическая точность инструментальных сталей при плоском маятниковом шлифовании кругом из хромистого электрокорунда. *Новые задачи технических наук и пути их решения. Сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф.*, Уфа, Изд-во Аэтерна, 2014, с. 65–72.
- [28] Ковальчук Ю.М., Букин В.А., Глаговский Б.А., Лысанов В.С., Овчинников А.А., Эфрос М.Г., Равикович В.В., Танхельсон Б.М. *Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента*. Москва, Машиностроение, 1984. 284 с.
- [29] Солер Я.И., Нгуен В. К. Прогнозирование микрорельефа стальных инструментов при шлифовании кругами из хромистого электрокорунда. *Научное обозрение*, 2014, № 11, с. 123–130.

References

- [1] 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.
- [2] Zubarev Iu.M. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia instrumental'nogo proizvodstva [Current state and prospects of development of tool production]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An Engineering journal with appendix]. 2013, no. 3, pp. 29–34.

- [3] Sakharov G.N., Arbuzov O.B., Borovoi Iu.L., Grechishnikov V.A., Kiselev A.S. *Metallozhushchie instrumenty* [Metal cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989. 328 p.
- [4] Geller Iu.A. *Instrumental'nye stali* [Tool steels]. Moscow, Metallurgiya publ., 1983. 527 p.
- [5] Gusseinor G.A., Bagirov S.A. Main feature of the mechanism of formation the surface grinding with periphery of straight disk. *International journal of Advances in Engineering & Technology*, 2014, vol.7 (1), pp. 66–74.
- [6] Kundrak J., Bana V. Size, form and position accuracy in machining of case hardened steels. *Proc. on the DMC 2002, Conference, Kosice, Slovakia, 22-23rd May 2002*, pp. 41–46.
- [7] GOST 24643–81. *Dopuski formy i raspolozheniia poverkhnosti. Chislovyie znacheniiia* [State Standard 24643-81. Tolerances of form and position of surfaces. Numeric values]. Moscow, Standartinform publ., 1981. 14 p.
- [8] GOST 2789–73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniiia* [State Standard 2789-73. The roughness of the surface. Options, features, and symbols]. Moscow, Standartinform publ., 1985. 10 p.
- [9] Sachsel H.G. *Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive and Superabrasive*. USA, Xlibris Corp., 2010. 680 p.
- [10] Webster J., Tricard M. Innovation in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2004, vol. 53 (2), pp. 597–617.
- [11] Armer A.I. *Povyshenie effektivnosti ploskogo maiatnikovogo shlifovaniia putem uskorennoogo vykhazhivaniia s primeneniem ustroistv dlia mikropodachi zagotovok*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing efficiency of flat grinding by pendulum accelerated nursing with application of the device for incremental feed of the blanks. Cand. tech. sci. diss.]. Ul'ianovsk, 2012. 208 p.
- [12] Kremen' Z.I., Iur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiia shlifovaniia v mashinostroenii* [Grinding tech in mechanical engineering]. Sankt-Peterburg, Politekhnik, 2007. 424 p.
- [13] Lur'e G.B. *Shlifovanie metallov* [Grinding of metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1969. 172 p.
- [14] Urbaniak M. Effect of the conditionins of CBN wheels on the technological results of HS6-5-2 steel grinding. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 31–39.
- [15] Feldshtein E., Dyachkova D. Surface texture of sintered iron-graphite MMCs infiltrated by copper alloys after grinding. *Advances in manufacturing science and technology*, 2013, vol. 37 (2), pp. 69–76.
- [16] Molchanov S.A., Mogilenskii V.I., Kaplan F.S. *Novyi abrazivnyi instrument na osnove spechennogo oksida aliuminiia* [New abrasive tools on the basis of sintered aluminum oxide]. *Stanki i instrument* [Russian Engineering Research]. 1991, no. 3, pp. 39–40.
- [17] Bonner A., Bright E., Lambert E.L., Matsumoto D.S., Orhac X., Sheldon D.A. *Abrasive Articles with Novel Structures and Methods of Grinding*. Pat. 7275980 US, Saint-Gobain Abrasive Technology Company, 2003.
- [18] Wu M. *Method for Making High Permeability Grinding Wheels*. Pat. 5738696 US, Norton Company, 1998.
- [19] Lindsay R.P. The performance of seeded gel abrasive in the laboratory and at customer test sites. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1989, vol. 61 (10), pp. 20–26.
- [20] Soler Ia.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.
- [21] Soler Ia.I., Nguen V.K. *Prognozirovaniie effektivnosti shlifovaniia krugami razlichnoi poristosti iz traditsionnykh i novykh abrazivov po kriteriiu tochnosti formy plastin R9M4K8* [Predicting Grinding Efficiency of Different Porosity Wheels from Traditional and New Abrasives by the Criterion of P9M4K8 Plate Shape Accuracy]. *Vestnik IrGTU* [Vestnik of Irkutsk State Technical University State Technical University]. 2014, no. 11 (94), pp. 49–58.
- [22] Kliachkin V.N. *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom: komp'iuternye tekhnologii* [Statistical methods in quality management: computer technology]. Moscow, Finance and Statistics, INFRA-M, 2009. 304 p.
- [23] Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. New York, Willy-Interscience, 1999. 787 p.

- [24] GOST R ISO 5726–2002. *Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniia. Ch. 1. Osnovnye poniatiia i opredeleniia* [ISO 5726–2002. Accuracy (correctness and precision) of methods and measurement results. Part 1. Basic concepts and definitions]. Moscow, Standartinform publ., 2002. 24 p.
- [25] Dobroskok V.L. *Povyshenie stabil'nosti protsessa shlifovaniia putem upravleniia rel'efom rabochei poverkhnosti almaznykh krugov*. Diss. kand. tekh. nauk [Improving the stability of the grinding process by controlling the elevation of the working surface of diamond wheels. Cand. tech. sci. diss.]. Khar'kov, 1986. 253 p.
- [26] Soler Ya. I., Nguyen Van Canh. The influence of sparking-out on formation stability of micro- and macro geometry high-speed plates in pendulum grinding by sinterkorund. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 2015, vol. 1-2, pp. 58–63.
- [27] Soler Ya.I., Nguyen V.C. Makrogeometricheskaia tochnost' instrumental'nykh stalei pri ploskom maiatnikovom shlifovanii krugom iz khromistogo elektrokورونا [Macro geometric precision tool steel with flat pendulum grinding circle of chromium corundum]. *Novye zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ikh resheniia: sb. st. mezhdunar. nauchno-prakt. konf.* [New tasks of engineering science and ways of their solution: a collection of articles of the international scientific-practical conference]. Ufa, Aeterna publ., 2014, pp. 65–72.
- [28] Koval'chuk Iu.M., Bukin V.A., Glagovskii B.A., Lysanov V.S., Ovchinnikov A.A., Efros M.G., Ravikovich V.V., Tankhel'son B.M. *Osnovy proektirovaniia i tekhnologiia izgotovleniia abrazivnogo i almaznogo instrumenta* [Fundamentals of design and technology of manufacturing of abrasive and diamond tools]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984. 284 p.
- [29] Soler Ya.I., Nguyen V.C. Prognozirovaniie mikrorel'efa stal'nykh instrumentov pri shlifovanii krugami iz khromistogo elektrokورونا [Prediction microrelief steel tools for grinding wheels made of chrome corundum]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. 2014, no. 11, pp. 123–130.

Статья поступила в редакцию 08.02.2016

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, Лермонтова ул., д. 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., д. 83, e-mail: vancanh.vn@mail.ru).

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).