

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 13X15H4AM3 ВЫСОКОПОРИСТЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

*Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент
В.Л. НГУЕН, аспирант, И.А. ГУЦОЛ, аспирант
(ИрГТУ, г. Иркутск)*

Поступила 18 февраля 2014
Рецензирование 10 апреля 2014
Принята к печати 15 апреля 2014

Солер Я.И. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский государственный технический университет,
e-mail: solera@istu.irk.ru

Рассмотрен процесс шлифования как завершающий этап изготовления ответственных деталей, критерием качества которых выступает шероховатость получаемых деталей, определяющая долговечность машин. Наиболее слабым звеном в технологической системе процесса является абразивный круг, режущие способности которого не представляется возможным выразить детерминированной величиной. В связи с этим оценка режущих свойств абразивного инструмента проведена с привлечением параметрического и непараметрического методов статистики, которые позволяют получить не только ожидаемую меру положения (среднюю, медиану), но и меру рассеяния, оценками которой выступают стандарты отклонений, размахи и интерквартильные широты. Меры рассеяния редко учитываются при оценке режущей способности абразивного инструмента, хотя только они позволяют охарактеризовать стабильность процесса. Сказанное особенно актуально при обработке крупных операционных партий деталей на настроенных станках. Исследование вели высокопористыми кругами нового поколения, в которых увеличена пористость до 10–12-й структуры и использованы высокопрочные зерна кубического нитрида бора (CBN50 100/80 CT1 10K27 100-КФ40) и микроскопического корунда (5SG 46I 12 VXP). Выявлено, что различие между ожидаемыми средними и медианами находится в пределах категориальной величины (KB), а наиболее точные оценки стабильности процесса получены с использованием стандартов отклонений. Шлифование плоских деталей из стали 13X15H4AM3 следует вести кругами из синтеркорунда 5SG, которые позволяют снизить высотные параметры шероховатости в 1,12...1,16 раза, т. е. на одну KB, и повысить стабильность процесса в 1,04...1,06 раза.

Ключевые слова: шлифование, высотный параметр шероховатости, статистика, среднее, медиана, стандарт отклонения.

Введение

Сталь 13X15H4AM3 (ВНС-5) обладает хорошей коррозионной устойчивостью и высокими механическими свойствами ($\sigma_b = 1390...1650$ МПа, $\delta = 15\%$, $E = 220$ ГПа), которые придает ей мартенситная структура. На завершающем этапе изготовления ответственные детали из стали ВНС-5 часто подвергаются шлифованию, которое ведут кругами из электрокорунда нормальной пористости с номерами структур 6–7. Однако

высокая плотность черепка инструмента, малый объем и размеры пор не позволяют эффективно шлифовать жаропрочные нержавеющие стали и сплавы, обладающие высокой вязкостью и пластичностью. В этом случае реальным резервом повышения производительности процесса и качества деталей служат высокопористые круги (ВПК), в которых получение более открытых структур достигается добавлением в состав формовочной массы порообразователей: стеклянных и керамических пустотелых шариков,

дробленой скорлупы фруктовых косточек и т. п. В процессе обжига инструмента порообразователи соответственно расплавляются или выгорают с возрастанием объема пор до 45...50 %, в том числе крупных пустот до 15...20 %. Одновременно формируется более благоприятная геометрия рабочей поверхности ВПК: снижаются относительные длины профиля и возрастают средние шаги между ними. Крупные поры образуют пространство для размещения снимаемой стружки, что уменьшает засаливание ВПК; улучшают подачу СОЖ через поры непосредственно в зону резания; снижают трение между поверхностью и заготовкой, а также температуру в зоне контакта между ними до двух раз, предотвращая появление прижогов и трещин. На шероховатость поверхности в наибольшей мере оказывает влияние зернистость порообразователя, которая не должна быть крупнее абразивных зерен. Для поддержания шероховатости деталей на заданном уровне рекомендуется в ВПК снижать размеры зерен основной фракции на один-два номера [1, 2].

Заготовки из труднообрабатываемых сталей и сплавов целесообразно шлифовать ВПК из кубического нитрида бора (КНБ) и синтеркорунда [3].

Совершенствование технологии синтеза КНБ позволило повысить прочность зерен: ЛКВ40, CBN40, ЛКВ50, CBN50 и др. Так, прочность зерен ЛКВ50 на сжатие возросла в 3,7 раза по сравнению с зернами ЛО и в 2,4 раза относительно ЛП. Одновременно отмечено снижение интенсивности их износа истиранием, хотя и в меньшей мере. Повышение прочности зерен КНБ ведет к росту коэффициента шлифования [2, 3]. Укрупнение пор от 0,16 (КФ16) до 0,4 мм (КФ40) обеспечивает снижение расхода электроэнергии и увеличивает коэффициент шлифования жаропрочных сплавов до 40 % по сравнению с кругами ЛКВ30 нормальной пористости [4].

Альтернативным материалом для КНБ является химически модифицированный спеченный по специальной золь-гель технологии микроскопический корунд (синтеркорунд), выпускаемый за рубежом под различными торговыми марками: *Sol-Gel* (SG), *Cubitron* и др. По своим физико-механическим свойствам синтеркорунд превосходит электрокорунд белый (25А) и приближается к КНБ, оставаясь дешевле последнего: 25А : SG : КНБ = 1 : (10 – 20) : (60 000)

[3–5]. Зерна SG имеют кристаллы с размерами 0,2...0,5 мкм, которые в 20...50 раз мельче, чем у абразива 25А. Это обеспечивает корундовым кругам повышение прочности до трех раз и работу в режиме умеренного самозатачивания путем обновления новых режущих кромок с минимальным износом. Последнее снижает засаливание этих ВПК и тем самым позволяет повысить производительность операций за счет уменьшения вспомогательного времени на правку.

В работах [6, 7] сопоставлены режущие способности кругов из КНБ и синтеркорунда при маятниковом и глубинном шлифовании, выполняемом по попутной схеме врезания инструментов. Установлено, что при маятниковом шлифовании исследуемые ВПК оказались равноценными по силам резания и размерному износу, но по шероховатости инструмент КНБ позволил снизить параметры R_a и R_z в 1,3...1,4 раза. При глубинном шлифовании выявились бесспорные преимущества эльборового круга перед синтеркорундом. Авторы [6, 7] старались создать идентичные условия проведения эксперимента, для чего ВПК из зерен КНБ и SG были изготовлены в идентичных условиях вплоть до состава керамической связки. При ознакомлении с методикой эксперимента складывается убеждение, что исследование проведено в адекватных условиях. Однако известно, что возможности любого круга значимо связаны с составом связки. Так, фирма *Norton* выпускает для шлифования сталей связки: *V*, *VX*, *VTX*, *VXPC*, *VXP* и др. В частности, связка *VXP* используется в ВПК с зернами синтеркорундов 3SG и 5SG, в которых присутствуют добавки зерен А в количестве 70 и 50 % соответственно. Зерна А представляют собой традиционный оксид алюминия с включением 3 % оксида титана. В кругах из синтеркорунда [6, 7] добавлены абразивы 25AF90, которые, вероятнее всего, уступают по режущим свойствам зернам А, поскольку в них отсутствуют оксиды титана. В работах [1–7 и др.] исследования проведены без учета стабильности процесса шлифования. Сказанное делает целесообразным углубление работы с участием ВПК с зернами CBN отечественной разработки и 5SG фирменного производителя *Norton*. В качестве выходных параметров процесса привлечены высоты микронеровностей, которые значимо коррелированы с режущими свойствами кругов

и оказывают значимое воздействие на эксплуатационные показатели машин [3, 8], в силу чего регламентируются на чертежах деталей.

Гипотетическая высота шероховатости без учета весовых коэффициентов представляется следующим выражением [8–11]:

$$H = \sum_{m=1}^5 h_m, \quad (1)$$

где h_1 – составляющая профиля, формируемая кинематическим переносом геометрических характеристик рельефа рабочей поверхности инструмента на заготовку; h_2 – составляющая профиля, возрастающая с увеличением амплитуды относительных колебаний круга и заготовки вследствие разноразмерности и хаотического расположения зерен в связке, а также неравномерного расположения крупных пор в черепке круга; h_3 – составляющая, учитывающая пластическую деформацию заготовки при врезании зерна в металл с образованием высот навалов по боковым сторонам шлифовочных рисков; h_4 – составляющая, обусловленная адгезионным взаимодействием абразивного инструмента с заготовкой; h_5 – составляющая, являющаяся результатом упругих отжатий зерен и черепка ВПК.

По мнению Носенко В.А. [12], первичным фактором в выражении (1) служит h_1 , а все остальные компоненты h_m , $m = \overline{2;5}$ следует отнести к вторичным величинам. Форма и размеры единичных рисков, из которых сформирована обработанная поверхность, непосредственно связаны с рельефом рабочей поверхности инструмента. Геометрические характеристики зерен КНБ и SG (острота кромок, малые радиусы их округления) ведут к снижению значимого ухудшения шероховатости в виде навалов h_4 при их врезании в металл. Составляющая h_2 в значительной мере зависит от технологии правки, что в первую очередь касается ВПК из КНБ.

Целью исследования является сопоставление режущих способностей кругов из КНБ и SG по топографии получаемой поверхности и выбор рекомендуемой характеристики по критерию шероховатости деталей, оцениваемому мерами положения и рассеяния.

Методика исследования

Натурные опыты проведены при следующих постоянных условиях: плоскошлифовальный станок – модели 3Е711В, 3Г71; образцы с размерами $D \times L = 40 \times 30$ мм, шлифуемые по торцу без выхаживания; технологические параметры – продольная подача $s_{пр} = 6$ м/мин, поперечная подача $s_{п} = 5$ мм/дв.ход, глубина резания $t = 0,01$ мм, операционный припуск $z = 0,1$ мм; СОЖ – 5 %-я эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин; число параллельных опытов $n = 30$ ($v = \overline{1;30}$); схема врезания круга в деталь – встречная. Переменные условия шлифования представлены в виде кода «*dijv*», удобном при статистической обработке наблюдений. В данном случае индекс $d = \overline{1;2}$ отражает направление шероховатости: 1 – параллельно вектору $s_{п}$, 2 – параллельно вектору $s_{пр}$. Код $i = \overline{1;2}$ связан с формой, размерами и характеристиками кругов: 1 – 1А1 200×20×76×3 CBN50 100/80 СТ1 10 К27 100 КФ40 (ГОСТ 17123-79), 2 – 01 250×20×76 5SG 46I 12VXP (каталог фирмы Norton). Индекс $j = \overline{1;3}$ отражает принятые меры рассеяния, которые рассмотрены ниже. Скорости резания (в м/с) составили соответственно $v_{к1} = 28$; $v_{к2} = 35$. Параметры шероховатости (ГОСТ 25142–82): (R_a, R_q, R_z, R_{max})_{di} – измерены с помощью системы на базе профилографа – профилметра модели 252 завода «Калибр».

Учитывая неустойчивость процесса шлифования и случайную природу формирования (1), анализ экспериментальных данных

$$\{y_{div}\}, d = i = \overline{1;2}, v = \overline{1;30} \quad (2)$$

ведем с привлечением статистических методов, которые, как известно, разделяются на параметрические и непараметрические (ранговые). Характеристиками одномерного распределения частот для (2) служат [13, 14], ГОСТ Р ИСО 5721-1–2002: для первого направления – средние $y_{di} = y_{di\bullet}$, стандарты отклонений (SD)_{di}, размахи $R_{di} = |y_{\max} - y_{\min}|_{di}$; для второго направления – медианы $\tilde{y}_{di}$, интерквартильные широты ИКШ_{di} = $|y_{0,75} - y_{0,25}|_{di}$. Первая частота ха-

рактирует меру положения (опорное значение), а последующие – меры рассеяния (прецизионность). При различии между $y_{di\bullet}$ и $\tilde{y}_{di}$ форма кривой распределения имеет асимметрию, которая приближенно вычисляется из выражения $As_{di} = [6(y_{\bullet} - \tilde{y}) / SD]_{di}$, $d = i = \overline{1;2}$, рассматриваемого при одноименных d и i .

Каждый метод статистики имеет «свое поле» [14] для эффективного применения в технических приложениях. Для параметрического метода необходимо, чтобы все данные (2) обладали свойствами гомоскедастичности (синонимы – однородность и гомогенность дисперсий отклонений) и нормальности распределений. Ранговые статистики не связаны с каким-либо семейством распределений, не используют его свойства, и в условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений (2) «на своем поле» по эффективности превосходит своего конкурента. Выбор статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних $\hat{y}_{di\bullet}$ и медиан $m\hat{y}_{di}$, $d = i = \overline{1;2}$ изложены в [13, 15, 16]. Процедура статистической интерпретации (2) включает в себя два последовательно выполняемых этапа: одномерный дисперсионный анализ (ОДА) на предмет установления факта значимого различия между уровнями мер положения, а затем их множественный анализ, завершающийся поиском ожидаемых аналогов. Обработка (2) связана с большим объемом вычислений и проведена в программной среде *Statistica* 6.1.478.0.

Влияние непараметрического метода на меры положения оцениваем медианными коэффициентами при одноименных $d = i = \overline{1;2}$:

$$K_{mdi} = (m\hat{y}_{di} / \hat{y}_{\bullet})_{di} \quad (3)$$

Оценку режущих свойств круга $i = 2$ относительно базового *CBN50* ($i = 1$) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот (2) при одноименных $d = \overline{1;2}$ [13, 17, 18]:

$$K_{d2} = (\tilde{y}_2 / \tilde{y}_1)_d, \quad (4)$$

$$\hat{K}_{d2} = (m\hat{y}_2 / m\hat{y}_1)_d, \quad (5)$$

$$K_{std21} = (SD_1 / SD_2)_d, \quad (6)$$

$$K_{std22} = (R_1 / R_2)_d, \quad (7)$$

$$K_{std23} = (ИКШ_1 / ИКШ_2)_d, \quad (8)$$

где индексы $j = \overline{1;3}$ в коэффициентах (6)–(8) отражают принятые меры рассеяния: 1 – SD_{di} (6), 2 – R_{di} (7) – для параметрических статистик; 3 – $ИКШ_{di}$ (8) – для ранговых статистик. Если по (4), (5) и (6–8) предсказаны $(K_{d2}, \hat{K}_{d2}) > 1$ и $K_{std2j} < 1$, $j = \overline{1;3}$, то меры положения и рассеяния шероховатостей при шлифовании кругом *SG* превышают соответствующие аналоги для ВПК с зернами *CBN* и таким образом уступают ему по режущим свойствам.

Результаты исследования и обсуждение

Нуль-гипотезы (H_0) относительно однородности дисперсий $(SD)_{di}^2$, $d = i = \overline{1;2}$ подтверждены в полном объеме, что редко встречается при шлифовании, особенно по высотным параметрам. H_0 о нормальности распределений (2) подтверждены только для круга *SG* ($i = 2$) по всем поперечным параметрам. С учетом полученных результатов решено воспользоваться параметрическим методом, а оценки ранговых критериев считать справочными. Как и ожидалось, поперечные шероховатости превысили продольные величины: в 4,8...6,6 раза для ВПК *CBN*, в 3,9...4 раза для ВПК *SG*, в силу чего они регламентируют состояние поверхности детали в целом.

ОДА и множественный анализ опытных средних $y_{1i\bullet}$, $i = \overline{1;2}$ выявили, что круги на 5 %-м уровне оказывают значимое влияние на большинство поперечных высотных параметров, за исключением наибольшей высоты профиля R_{max1} . Как видно из табл. 1, последний характеризуется общей средней $R_{max1\bullet} = 2,6$ мкм ($3,2^*$). В то же время непараметрический метод дополнительно признал, что опытные медианы $\tilde{R}_{qli}$, $i = \overline{1;2}$ (см. табл. 1) извлечены из единой генеральной совокупности и оцениваются величиной $m\hat{y}_{1\bullet} = 0,52$ ($0,63^*$) мкм. Коэффициенты K_{mli} (3), вычисленные по прогнозируемым мерам положения (см. табл. 1), свидетельствуют о том, что кривые формы распределений характе-

Влияние характеристик кругов на меры положения высотных параметров шероховатости и коэффициенты (3)–(5)

Параметры	Круги <i>i</i>	$y_{li\bullet}$	$\tilde{y}_{li}$	$\hat{y}_{li\bullet}$	$m\hat{y}_{li}$	$K_{\text{М}li}$ (3)	K_{12} (4)	$\hat{K}_{12}$ (5)
		МКМ						
R_{ali}	1	0,45 (0,50 [*])	0,43 (0,50 [*])	0,45 (0,50 [*])	0,43 (0,50 [*])	0,96	0,87	0,93
	2	0,39 (0,40 [*])	0,40 (0,40 [*])	0,39 (0,40 [*])	0,40 (0,40 [*])	1,03		
R_{qli}	1	0,57 (0,63 [*])	0,54 (0,63 [*])	0,57 (0,63 [*])	0,52 (0,63 [*])	0,91	0,79	1,00
	2	0,49 (0,50 [*])	0,50 (0,50 [*])	0,45 (0,50 [*])	0,52 (0,63 [*])	1,16		
R_{zli}	1	1,84 (2,0 [*])	1,77 (2,0 [*])	1,84 (2,0 [*])	1,77 (2,0 [*])	0,96	0,86	0,89
	2	1,58 (1,6 [*])	1,57 (1,6 [*])	1,58 (1,6 [*])	1,57 (1,6 [*])	0,99		
$R_{\text{max}li}$	1	2,74 (3,2 [*])	2,59 (3,2 [*])	2,60 (3,2 [*])	2,54 (3,2 [*])	0,98	1,00	1,00
	2	2,45 (2,5 [*])	2,49 (2,5 [*])	2,60 (3,2 [*])	2,54 (3,2 [*])	0,98		
Примечание. Круги <i>i</i> : 1-СВN50, 2-5SG; «*» категориальные величины по ГОСТ 2789–73								

ризуются положительной асимметрией, поскольку в шести из восьми случаев предсказаны меньше единицы. Дополнительно подчеркнем, что опорные значения для конкретного круга находятся в пределах одной КВ. По опытным мерам положения шлифование кругом SG следует признать более предпочтительным, поскольку обеспечивается снижение высот микронеровностей на одну КВ по сравнению с ВПК СВN50. По прогнозируемым опорным величинам отмеченная закономерность выглядит менее убедительной, поскольку дополнительно для высот $m\hat{R}_{qli}, i = \overline{1;2}$ коэффициент (5) оказался равным единице. Если сопоставить опытные средние $\bar{R}_{ali}, i = \overline{1;2}$ (см. табл. 1) с результатами [6, 7], то следует признать, что они различаются кардинально. В [6, 7] шлифование закаленных сталей ВПК ЛКВ 160/125 СТ1 12V (АЭРОБОР) привело не к росту шероховатости R_{al} относительно SG 80/25A M 12V, как отмечено в табл. 1, а, напротив, к ее снижению также на одну КВ. Результаты [6, 7] противоречат механике процесса шлифования. Для круга АЭРОБОР зернистость выбрана на два номера крупнее, а для ВПК $i = 2$, наоборот, размеры зерен SG взяты на пять номеров мельче, чем в нашем исследовании. Следовало ожидать, что результаты, приведенные в

табл. 1, должны усилиться в пользу круга из керамического корунда. Дополнительно сопоставляемые ВПК имели различие по степени твердости. Ее роль раскрыта в работах [12, 19]: с уменьшением прочности удержания абразивных зерен в черепке круга должна снижаться удельная работа его разрушения, т. е. вырывания зерен из связки. При этом параметр R_{al} должен возрастать. Скалывание зерен (самозатачивание) не зависит от твердости инструмента. Роль истирания коррелирована с нагрузкой и усиливается с ее ростом. В условиях отсутствия поступления новых вершин зерен в зону контакта с деталью ее шероховатость стабилизируется. С изложенных позиций параметр R_{al} для круга АЭРОБОР [12, 19] должен был ухудшиться, а для более твердого инструмента из зерен SG – снизиться. Расхождение результатов может быть обосновано следующим образом:

- в круге из синтеркорунда [6, 7] отсутствует информация о процентном содержании зерен SG и 25A в смеси, а технология его изготовления могла дополнительно повлиять на снижение его режущей способности в целом по сравнению с фирменным инструментом;

- в [6, 7] не указана прочность используемых зерен ЛКВ; возможно зерна СВN50 (см. табл. 1) дают более шероховатую поверхность по сравнению с ЛКВ [6, 7].

Последняя гипотеза была проверена при шлифовании деталей из стали 08X15H5Д2Т (ВНС-2), обрабатываемость шлифованием которой сопоставима с исследуемым материалом деталей. К ВПК $i = \overline{1;2}$ был добавлен инструмент ЛКВ50 160/125 СТ1 10КС10 100 КФ40. Опыты проведены на принятом режиме резания. Для стали ВНС-2 были подтверждены ранее полученные результаты: по поперечным параметрам шероховатости $(R_a, R_q, R_{\max})_1$ наименьшие меры положения показал ВПК из синтеркорунда: в 1,6...1,9 раза по сравнению с ВПК $i = 1$ и в 1,4...1,8 раза по отношению к кругу АЭРОБОР. В таком случае расхождение оценок режущих способностей кругов, вероятнее всего, обусловлены первыми двумя гипотезами. Во-первых, более низкими режущими свойствами круга SG [6, 7] по отношению к фирменному $i = 2$, в котором задано высокое содержание зерен SG ($SG : A = 1 : 1$). Это обеспечивает высокую режущую способность и увеличенный срок службы инструмента $i = 2$. Во-вторых, ВПК с зернами $CBN50$ и $ЛКВ50$ возможно обладают большей прочностью относительно зерен $ЛКВ$ [6, 7], которые даны без указания их условной прочности. В таком случае это может снизить самозатачивание ВПК в целом и ухудшить шероховатость поверхности. По результатам шлифования деталей из стали ВНС-5 и ВНС-2 обнаружено, что наименьшие меры положения по параметрам $(R_a, R_q, R_z, R_{\max})_1$ обеспечивает ВПК с зернами синтеркорунда, что делает его наиболее перспективным инструментом при чистовом шлифовании коррозионно-стойких сталей повышенной прочности.

Установлено, что круги $i = \overline{1;2}$ не оказали значимого воздействия на высотные микронеровности топографии поверхности в направлении вектора s_{np} . По прогнозируемым средним их можно охарактеризовать следующими величинами: $\hat{R}_{a2} \dots 0,10$ (0,10*), $\hat{R}_{q2} \dots 0,12$ (0,125*), $\hat{R}_{z2} \dots 0,31$ (0,32*) и $\hat{R}_{\max 2} \dots 0,59$ (0,63*). В границах указанных КВ расположены ожидаемые медианы. Анизотропия высотных шероховатостей по ожидаемым средним может быть представлена следующими корреляционными коэффициентами: $(\hat{R}_{a1} / \hat{R}_{a2}, \hat{R}_{q1} / \hat{R}_{q2}) = 4,5 \dots 4,75$

при шлифовании кругом $CBN50$ и 3,75...3,9 – для инструмента $5SG$; $\hat{R}_{z1} / \hat{R}_{z2}$ соответственно 5,6 и 5,1; $\hat{R}_{\max 1} / \hat{R}_{\max 2} = 4,4$ для обеих ВПК $i = \overline{1;2}$.

Генезис формирования шероховатостей (1) позволяет считать, что уменьшение высот микронеровностей связано с составляющей h_1 , которая снижается с увеличением числа режущих зерен на рабочей поверхности ВПК. Этим требованиям наиболее полно соответствует круг $i = 2$, износ которого протекает путем микровыкрашивания частиц $5SG$ с размерами 0,2...0,5 мкм [3, 12].

Режущую способность ВПК характеризует не только их способность формировать на поверхности детали определенную шероховатость, но и поддержание или воспроизводимость ее величины на протяжении всего процесса шлифования операционной партии. При сопоставлении работы нескольких инструментов удобно воспользоваться (6)–(8), которые получены по фактическому разбросу наблюдений без учета допуска их рассеяния [17, 18].

В табл. 2 представлены результаты влияния кругов $i = \overline{1;2}$ на стабильность формирования высотных шероховатостей в двух взаимно ортогональных направлениях. Анализ полученных данных ведем в условиях приоритетного отношения к стандартам отклонений, размахам и полученным на их базе коэффициентам (6) и (7). При этом учитываем, что управление стабильностью процесса всегда получается более точным с использованием стандартов отклонений по сравнению с размахами. Как видно из табл. 2, в поперечном направлении, регламентирующем состояние микрорельефа поверхности, преимущества по стандартам SD_{12} имеют круги из синтеркорунда, о чем свидетельствуют коэффициенты стабильности $K_{cr121} = 1,04 \dots 1,07$ для параметров R_{a1}, R_{q1} и R_{z1} . Эти результаты подтверждены только для параметра R_{z1} : $K_{cr122} = 1,03$ – по размахам, $K_{cr123} = 1,33$ – по интерквартильным широтам. В последнем случае стабильность процесса для круга $i = 2$ даже возросла. Для наибольшей высоты неровностей воспроизводимость процесса повышает ВПК CBN : $K_{cr12j} = 0,92 \dots 0,98$, $j = \overline{1;3}$. В продольном направлении предсказаны прямо противоположные ре-

зультаты: для параметра $R_{\max 2}$ коэффициенты $K_{\text{ст}2j}$, $j = 1$ и 3 возросли до $1,4$ раза, а для остальных, кроме R_{q2} , снизились до $0,8$. Таким образом,

«на своем поле» для параметрического метода результаты стабильности процесса по (6) оказались наиболее точными и надежными.

Таблица 2

Оценка режущих способностей кругов по мерам рассеяния (6)–(8)

Пара- метры	Круги i	SD_{1i}	R_{di}	ИКШ $_{di}$	$K_{\text{std}2j}$		
		мкм			$j = 1$ (6)	$j = 2$ (7)	$j = 3$ (8)
R_{a1i}	1	0,103531	0,400997	0,112000	1,04	0,86	1,00
	2	0,099848	0,46666	0,112000			
R_{q1i}	1	0,130407	0,511667	0,128666	1,05	0,89	0,86
	2	0,123790	0,577653	0,150333			
R_{z1i}	1	0,345787	1,460000	0,408000	1,07	1,03	1,33
	2	0,322824	1,417663	0,306633			
$R_{\text{max}1i}$	1	0,585490	2,480000	0,712333	0,98	0,96	0,92
	2	0,599120	2,592993	0,771666			
R_{a2i}	1	0,039212	0,168330	0,045667	0,96	0,94	0,98
	2	0,040902	0,179330	0,046667			
R_{q2i}	1	0,048554	0,207330	0,060000	1,00	0,99	1,05
	2	0,048544	0,208667	0,057000			
R_{z2i}	1	1,104803	0,431667	0,107000	0,81	0,90	0,95
	2	0,129394	0,480327	0,113000			
$R_{\text{max}2i}$	1	0,214979	0,830000	0,291666	1,01	0,90	1,44
	2	0,212557	0,926670	0,202334			
Примечание. Круги i : 1-CBN50100/80 CT1 10 K27 100 KФ40, 2-5SG 46I 12VXP							

Выводы

1. Подтверждена гипотеза относительно гомотенности отклонений наблюдений по высотным параметрам шероховатости при шлифовании деталей ВНС-5 кругами CBN50 100/80 CT1 10 K27 100 KФ40 и 5SG 46I 12VXP, что свидетельствует об их высоких режущих свойствах.

2. В большинстве исследований не уделяется внимания величинам дисперсий отклонений, хотя статистические методы позволяют получить данную характеристику распределений частот. В работе раскрыты возможности оценки стабильности процесса по стандартам отклонений, размахам и интерквартильным широтам. Показано, что в условиях приоритетного использования параметрического метода статистики наиболее адекватным оказался коэффициент

стабильности (6), учитывающий фактический разброс стандартов наблюдений без учета их допуска рассеяния.

3. Установлено, что шлифование деталей из закаленной стали 13X15H4AM3 следует выполнять кругом 5SG 46I 12VXP, который позволяет снизить высотные шероховатости в поперечном направлении до одной KB и повысить воспроизводимость процесса в $1,04 \dots 1,07$ раза. Последнее особенно важно при шлифовании крупных операционных партий деталей на настроенных станках.

Список литературы

1. Багайсков Ю.С., Шумячер В.М. Улучшение структурно-механических и эксплуатационных свойств абразивных инструментов с порообразо-

- вателем // Технология машиностроения. – 2007. – № 3. – С. 34–37.
2. Кремень З.И. Высокопористые круги – эффективное средство повышения производительности шлифования и качества деталей из различных материалов // Инструмент и технологии. – 2001. – № 5–6. – С. 34–37.
3. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении; под общ. ред. З.И. Кременя. – СПб: Политехника, 2007. – 424 с.
4. Кремень З.И., Лебедев А.И. Анализ возможностей управления пористостью шлифовальных кругов из эльбора с целью расширения областей их применения // Инструмент и технологии. – 2010. – № 27. – Вып. 1. – С. 46–49.
5. Лебедев А.И. Повышение эффективности процесса шлифования труднообрабатываемых материалов путем применения специальных крупнопористых кругов из эльбора: автореф. дис... канд. техн. наук (05.02.07). – Рыбинск: РГТА, 2010. – 16 с.
6. Старков В.К., Поклад В.А., Кайзер М. и др. Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых кругов при профильном зубошлифовании // Технология машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 17–22.
7. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
8. Инженерия поверхности / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
9. Полканов Е.Г., Кискин О.С., Големи С. и др. Применение высокопористых кругов из синтеркорунда при профильном шлифовании фасонного режущего инструмента // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 11. – С. 30–32.
10. Унянин А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов: дис. ... д-ра техн. наук (05.03.01). – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – С. 41–49.
11. Шумячер В.М., Кадильников А.В. Влияние формы поверхности шлифовального круга и ориентации абразивного зерна в связке на начало процесса стружкообразования // Технология машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 29–33.
12. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 616 с.
13. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. В.Н. Варыгина; под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – С. 598.
14. Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики / пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 506 с.
15. 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.
16. Soler Ya.I., Prokop'eva A.V. More precise geometric prediction of high-speed plates for composite tools in boron-nitride grinding // Russian engineering research, 2011, vol. 33, No. 8, pp. 800–811.
17. Солер Я.И., Нгуен В.Л., Нгуен Ч.К. Прогнозирование точности формы плоских деталей из закаленных сталей при маятниковом шлифовании периферией абразивного круга // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 12 (19). – Ч. 1. – С. 128–134.
18. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами / пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с.
19. Бикпавленова Д.Р. Повышение эффективности шлифования путем управления структурно-механическими характеристиками абразивного инструмента на керамическом связующем: автореф. дис... канд. техн. наук. (05.03.01). – Волгоград: ВолГТУ, 2005. – 15 с.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 21–30

Prediction of microgeometry in pendulous grinding of plane parts made of steel 13X15H4AM3 by high porous wheels

Soler Ya.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru

Nguyen V.L., Post-graduate Student,

Gutsol I.A., Post-graduate Student

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

Abstract

The grinding process is used at the final stage of manufacture of responsible parts. The quality criterion in this case is surfaced roughness that determining machine durability. Abrasive wheels are the weakest link in process technology system, which cutting abilities can't be expressed as a deterministic quantity. In this connection the assessment of cutting properties of abrasive wheels is conducted with attraction of parametric and nonparametric statistical methods that allow to find not only expected measure of position (mean, median), but also a measure of scattering, estimated by deviations standards, swings and interquartile widths. The measures of scattering are seldom considered in estimating of cutting ability of abrasive wheel, although they only allow to characterize the stability of the process. This is especially important in processing of large operating batches of parts on customized machines. The research is conducted with high porous wheels (VPK) of new generation, which porosity was increased to (10-12)th structure and high-strength grains of cubic boron nitride (CBN50 100/80 CT1 10K27 100-KФ40) and microscopical corundum (5SG 46I 12 VXP) are used. It is revealed that the difference between expected means and medians is in the limit of categorical variables (CV), and the most accurate estimates of process stability are obtained with deviations of standard. Grinding of flat parts made of steel 13X15H4AM3 should be occurred with wheels made of synthetic corundum 5SG that allows to decrease the high parameters of roughness - 1,121,16 times higher (that means one CV) and increase the process stability in 1,04-1,06 times.

Keywords:

grinding, high roughness parameters, statistics, mean, median, deviation of standard

References

1. Bagayskov Yu.S., Shumyacher V.M. Uluchshenie strukturno-mekhanicheskikh i ekspluatatsionnykh svoistv abrazivnykh instrumentov s poroobrazovatelem [Improvement of constructive-mechanical properties and operating abilities of the porophore abrasive tool]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya - Mechanical Engineering*, 2007, no. 3. pp. 34–37.
2. Kremen' Z.I. Vysokoporistye krugi – effektivnoe sredstvo povysheniia proizvoditel'nosti shlifovaniia i kachestva detalei iz razlichnykh materialov [The highly wheels - an effective means of improving productivity and quality of grinding parts from different materials]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technologies*, 2001, no. 5–6, pp. 34–37.
3. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniia v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2007. 424 p.
4. Kremen' Z.I., Lebedev A.I. Analiz vozmozhnostei upravleniia poristost'iu shlifoval'nykh krugov iz el'bora s tsel'iu rasshireniia oblastei ikh primeneniia [Analysis of management capabilities porosity grinding wheels CBN to expand their areas of application]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technologies*, 2010, no. 27, Issue 1, pp. 46–49.
5. Lebedev A.I. *Povyshenie effektivnosti protsessa shlifovaniia trudnoobrabatyvaemykh materialov putem primeneniia spetsial'nykh krupnoporistykh krugov iz el'bora*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increase in the efficiency of grinding hard materials by using special macroporous CBN wheels. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Rybinsk, RSATU Publ., 2010. 16 p.
6. Starkov V. K., Ryabtsev S. A., Poklad V. A., Novikov V. S., Kayzer M., Kostrov S. V. Sravnitel'nyi analiz rabotosposobnosti vysokoporistykh el'borovykh i korundovykh krugov pri profil'nom zuboshlifovanii [Working capacity comparative analysis of high-porous L-boric and corundum wheels at contour gear grinding]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya - Mechanical Engineering*, 2007, no. 2, pp. 17–22.
7. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Highly porous grinding wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 688 p.
8. Suslov A.G., Bez'iazychnyi V.F., Panfilov Yu.V., Bishutin S.G., Govorov I.V., Gorlenko A.O., Gorlenko O.A., Petreshin D.I., Sakalo V.I., S'ianov S.Yu., Tikhomirov V.P., Fedonin O.N., Fedorov V.P., Finatov D.N., Shcherbakov A.N. *Inzheneriia poverkhnosti* [Surface Engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 s.
9. Polkanov E.G., Kiskin O.S., Holey S., Ryabtsev S.A. Primenenie vysokoporistykh krugov iz sinterkorunda pri profil'nom shlifovanii fasonnogo rezhushchego instrumenta [Application of highly porous wheels from sintered corundum for profile grinding the shared cutting tool]. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal – HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2008, no. 11, pp. 30–32.
10. Unianin A.N. *Nauchnoe i tekhnologicheskoe obespechenie shlifovaniia zagotovok iz plastichnykh stalei i spлавov s predotvrashcheniem zasalivaniia abrazivnykh krugov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and technological

support for the grinding of workpieces plastic steels and alloys to prevent clogging of abrasive wheels. Dr. eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2006. 537 p.

11. Shumyacher V. M., Kadilnikov A. V. Vliianie formy poverkhnosti shlifoval'nogo kruga i orientatsii abrazivnogo zerna v svyazke na nachalo protsessa struzhkoobrazovaniia [Effect of surface form and abrasive grain orientation at the beginning of the chips-making process at grinding]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya – Mechanical Engineering*, 2007, no. 5, pp. 29–33.

12. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniia metallov: monografiia* [Metal grinding technology: monograph]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2012. 616 p.

13. Sachs Lothar. *Statistische Auswertungsmethoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972. 548 p. (Russ. ed.: Trans. eng. Varygina V.N. Edited by Adler Yu.P., Gorskii V.G., *Statisticheskoe otsenivanie*. Moscow, Statistika Publ., 1976. 598 p.)

14. Hollander Myles, Wolfe D.A. *Nonparametric Statistical Methods*. John Wiley & Sons, 1973. 528 p. (Russ. ed: Trans. eng. Shmerling D.S. Edited by Adler Yu.P., Tiurin Yu.N. *Neparametricheskie metody statistiki*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983. 506 p.)

15. 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, Issue 3, pp. 251–261.

16. Soler Ya.I., Prokop'eva A.V. More precise geometric prediction of high-speed plates for composite tools in boron-nitride grinding. *Russian Engineering Research*, 2011, Vol. 33, Issue 8, pp. 800–811.

17. Soler Ya.I., Nguyen Van Le, Nguyen Chi Kien. Prognozirovanie tochnosti formy ploskikh detalei iz zakalennykh stalei pri maiatnikovom shlifovanii periferiei abrazivnogo kruga [Prediction of shape precision of hardened steel flat parts at pendular grinding with periphery of the abrasive wheel]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2013, no. 12(19), Part 1, pp. 128–134.

18. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Understanding Statistical Process Control*. Knoxville, Tennessee: SPC Press, Inc. Introduction by W. Edwards Deming, 1992. (Russ. ed: Trans. eng. Kuz'min V., Adler Yu. Edited by Adler Yu., Shper V. *Statisticheskoe upravlenie protsessami. Optimizatsiia biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta*. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p.)

19. Bikaplenova D.R. *Povyshenie effektivnosti shlifovaniia putem upravleniia strukturno-mekhanicheskimi kharakteristikami abrazivnogo instrumenta na keramicheskom svyazuiushchem*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the grinding efficiency by controlling the structural and mechanical characteristics of the abrasive tool with a ceramic binder. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Volgograd, 2005. 15 p.

Received 18 February 2014

Revised 10 April 2014

Accepted 15 April 2014