УДК 621.923.1

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ЗАДАНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ПОДАЧИ ПО МИКРОРЕЛЬЕФУ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ПРИ ШЛИФОВАНИИ ВЫСОКОПОРИСТЫМ АБРАЗИВОМ

Я.И.Солер[1], А.Б.Стрелков[2], В.Л.Нгуен[3], В.К.Нгуен[4]
Иркутский государственный технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

До настоящего времени отсутствуют аргументированные рекомендации по выбору схемы задания поперечной подачи $s_{\text{п}}$, которая на плоско-шлифовальных станках с прямоугольным столом может назначаться на двойной и одинарный ход. Принято считать, что оба варианта при равной производительности равноценны по выходным параметрам процесса. Установлено, что шлифование следует вести с подачей в мм/ход. Это по сравнению с альтернативным вариантом обеспечивает снижение высотных параметров шероховатости на 1–2 категориальные величины по ГОСТ 2789-73 и рассеяния отклонений в 1,5–2 раза, что улучшает состояние поверхности и повышает стабильность процесса. Остальные параметры шероховатости: S, S_m, t_p, $p=\overline{5\%,95\%}$ – на 5%-ом уровне значимости, не зависят от схемы задания $s_{\text{п}}$ и принадлежат одной генеральной совокупности.

Ил. 3. Табл. 3. Библиогр. 10 назв.

Ключевые слова: шлифование; абразивный круг; шероховатость; поперечная подача; статистика.

OPTIMIZING ALTERNATIVES OF CROSSFEED ON HIGH SPEED-PLATE SURFACE MICRORELIEF UNDER HIGHPOROUS ABRASIVE GRINDING

Ya.I. Soler, A.B. Strelkov, V.L. Nguen, V.K. Nguen
Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074

There is still lack of reasoned recommendations on choosing the alternative of a crossfeed $s_{\text{п}}$, which can be set for a single or double pass of a long table surface grinder. Under equal performance both alternatives are assumed to be equivalent by the output process parameters. It is determined that grinding must be implemented with the mm/rev feed. Comparing with the alternative option it ensures decrease in roughness altitude parameters nearly by 1-2 categorical units according to the Standard 2789-73 and deflection precision by 1.5-2 times. The last improves the surface condition and increases process stability. The remaining roughness parameters: S, S_m, t_p, $p=\overline{5\%,95\%}$ are on 5% significance level. They do not depend on the crossfeed alternative $s_{\text{п}}$ and belong to a single population.

3 figures. 3 tables. 10 sources.

Key words: grinding; abrasive wheel; roughness; crossfeed; statistics.

Микрорельеф поверхности с позиции контактного взаимодействия твёрдых тел – показатель, во многом определяющий надёжность и стойкость режущих инструментов. Топография поверхности быстрорежущих пластин (БП), формообразуемых при шлифовании, с геометрической точки зрения представляет собой «слепок» в виде остаточных гребешков, копирующих режущую поверхность абразивных кругов и кинематику процесса. В её формировании участвует большое число активных режущих кромок зёрен – от чрезвычайно мелких в несколько микрометров до более крупных в 30–40 мкм. При этом зёрна имеют случайную геометрическую форму, хаотическое расположение в черепке круга и разновысотность в радиальном направлении. Режущие кромки этих зёрен, перемещаясь с большой скоростью относительно заготовки, внедряются в металл на разную глубину, оставляя на поверхности риски, формирующие её микрорельеф. По этой причине ряд важнейших показателей процесса, таких как углы заострения и радиусы округления

[1]Солер Яков Иосифович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, тел.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru
Soler Yakov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, tel.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru
[2]Стрелков Алексей Борисович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, тел.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru
Strelkov Aleksei, Candidate of technical sciences, Senior Lecturer of the Department of Technology of Mechanical Engineering, tel.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru
[3]Нгуен Ван Ле, студент, тел.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru
Nguen Van Le, Student, tel.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru
[4]Нгуен Ван Кань, студент, тел.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru
Nguen Van Canh, Student, tel.: (3952) 405459, e-mail: solera@istu.irk.ru

кромок, толщины среза каждой режущей кромкой и их число, одновременно участвующее в работе, являются случайными величинами (СВ). Сказанное обуславливает целесообразность привлечения для изучения шлифования вероятностно-статистических подходов. Снижение трудоёмкости вычислений при проверке статистических гипотез и повышение надёжности их принятия в работе обеспечено использованием программы *Statistica* 6.1.478.0.

Как известно, при работе на плоскошлифовальных станках могут использоваться две альтернативные схемы задания поперечной подачи $s_{\text{пі}}$, $i=\overline{1;2}$: 1 – на двойной ход стола в мм/дв.ход; 2 – на каждый ход продольного стола в мм/ход. К сожалению, в нормативно-технических документах этому технологическому приёму не уделяется должного внимания и отсутствуют, как ни странно, какие-либо рекомендации по этому вопросу. По этой причине на практике исходят из того, что при выборе варианта задания поперечной подачи стремятся сохранить производительность съёма металла. При этом гипотетически предполагают, что качество шлифуемых деталей остаётся неизменным. Обоснованность такого подхода предстоит выявить в данном исследовании.

В работе приняты следующие условия реализации экспериментальной части исследования: плоскошлифовальный станок модели 3Г71; круги 1 250×20×76 25AF46 M12 V5 – ПО по ГОСТ Р 52781-2007 (производитель – ОАО «Лужский абразивный завод»); окружная скорость резания $\upsilon_{\text{к}}$ =35 м/с; продольная подача $s_{\text{пр}}$ =7 м/мин; глубина резания *t*=0,015 мм; поперечная подача ($i=\overline{1;2}$): 1 – $s_{\text{п}1}$ = 1 мм/дв.ход, 2 – $s_{\text{п}2}$ =0,5 мм/ход; операционный припуск z=0,15 мм; СОЖ – 5%-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148843-98), подаваемая поливом на деталь (7-10 л/мин); БП из стали Р9К5 (HRC 64-67) с размерами *D*×*H*=40×30 мм, шлифуемые по круглому торцу; число дублирующих опытов *n*=30 ($v=\overline{1;30}$). Состояние микрорельефа поверхности БП оценивали следующими параметрами (ГОСТ 25142-82): R_a, R_q, R_z, R_{max}, S, S_m, t_p, $p=\overline{5;95}$ %, которые измерены с помощью системы на базе профилографа-профилометра мод. 252 завода «Калибр» в двух взаимно ортогональных направлениях ($d=\overline{1;2}$), параллельных векторам подач: 1 – $s_{\text{п}}$ ($R_{a(1i)}, t_{40(1i)}$ и т.д.), 2 – $s_{\text{пр}}$ ($R_{a(2i)}, t_{40(2i)}$ и т.д.).

Выходные параметры процесса с учетом условий шлифования представим в виде последовательностей

$$\{y_{di}\}, \qquad (1)$$

которые позволяют отыскать следующие характеристики в эмпирических распределениях:

- меры положения (опытные средние $\bar{y}_{di}=y_{di\bullet}$ и медианы $\tilde{y}_{di}$);
- меры рассеяния – стандарты отклонений $\sigma(y)_{di}$ или их дисперсии $\sigma^2(y)_{di}$, размахи $R_{di}=(y_{max}-y_{min})_{di}$, интерквартильные широты $(y_{0,75}-y_{0,25})_{di}$;
- меры формы этих распределений, например, асимметрию (скошенность).

Точка в выходном параметре $y_{di\bullet}$ свидетельствует о том, что по переменной *v* выполнен поиск средней среди наблюдений (1).

Алгоритм поиска ожидаемых средних y_{di} и медиан $m\tilde{y}_{di}$, $d=i=\overline{1;2}$, с учётом статистических оценок иллюстрирует рис.1, из которого видно, что они по используемому аппарату разбиты на две группы: параметрическую и непараметрическую [3,10]. Выбор метода интерпретации экспериментальных данных (1) зависит от результатов, полученных на этапах 1 и 2. Если наблюдения подчиняются нормальному распределению с однородными дисперсиями $\sigma_{di}{}^2$, $d=i=\overline{1;2}$ (синонимы: гомогенность и гомоскедастичность), то для них целесообразно использовать параметрический метод [3]. В теоретической статистике утверждается, что (1) могут иметь незначительные отклонения от кривой Гаусса. Однако количественная оценка такого отклонения отсутствует, что на практике затрудняет возможность использования допущения. При выполнении указанных ограничений, накладываемых на СВ в полной мере, целесообразно использовать параметрическую статистику. В противном случае следует привлечь непараметрические критерии.

Для подтверждения гипотезы о нормальности распределений (1) в программе воспользовались статистикой Шапиро-Уилка, которая по надёжности принятия нуль-гипотезы (H_0) превосходит более известную статистику Колмогорова-Смирнова, чаще всего используемую в технических приложениях [4,5]:

$$\alpha_{\text{р}} > 0{,}5, \qquad (2)$$

где $\alpha_{\text{р}}$ – надёжность критерия H_0.

Решение относительно гомогенности дисперсий $\sigma_i{}^2$, $i=\overline{1;2}$, вели по тестам ($q=\overline{1;3}$): 1 – Хартли (F_{max}), Кохрена (*G*) и Бартлетта (χ^2); 2 – Левена; 3 – Брауна-Форсайта. В программе оценки критериев F_{max}, *G* и χ^2 по (2) представлены одной величиной $\alpha_{\text{р}}$ как равновероятные, поэтому они объединены в одну группу *q*=1. Проверки гипотез (2) и однородности дисперсий рассмотрены в [4,5]. В данном исследовании остановимся на некоторых частностях, имеющих практический интерес. Известно, что статистические гипотезы принимаются с определённой ошибкой и одни и те же совокупности, проанализированные с помощью критериев $q=\overline{1;3}$, могут иметь не всегда

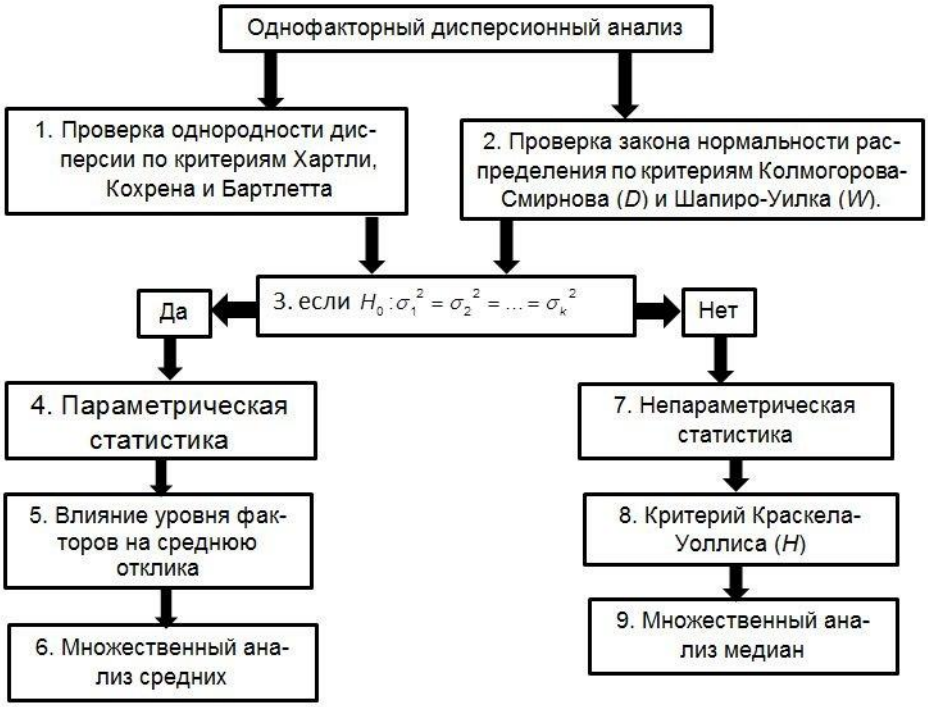


Рис.1. Алгоритм поиска ожидаемых мер положения (1)

одинаковые решения f_0 относительно H_0. Однородность дисперсий σ_{di}^2, $d = i = \overline{1;2}$, принимали из условия $f_o \in [2;3]$.

Из литературных данных [6,8,9] известно, что между параметрами R_q, R_z, R_{max} (в общем виде $y_u, u = \overline{1;3}$), R_a (соответственно $u = 4$), а также направлениями их измерения ($d = \overline{1;2}$) имеются корреляционные связи. Их целесообразно представить в следующем виде:

• для однонаправленных сечений при фиксированных $d \in [1;2]$ и $i \in [1;2]$

$$my_{udi} = K_{di} \times mR_{adi}, u = \overline{1:3}; \quad (3)$$

• для ортогональных сечений поверхности при одноимённых *u* и *i*

$$my_{u1i} = K_{1i} \times my_{u2i}, u \in [1;4], i \in [1;2], \quad (4)$$

где K_{di}, K_{1i} – корреляционные коэффициенты.

При анализе (1) выявлено, что наиболее строгие требования к однородности дисперсий предъявляют критерии 1-ой группы (*q*=1), а наименьшие – статистика Брауна-Форсайта, предложенная как модернизация критерия Левена.

Гомогенность дисперсий проанализирована для 24 параметров в каждом из направлений ($d = \overline{1;2}$). Установлено, что H_0 нарушена для следующих параметров шероховатости: (R_a, R_q, R_z, R_{max})$_1$, R_{q2}, t_{p1}, $p = \overline{55\%;60\%}$. Намного хуже оказались результаты тестов относительно нормальности распределений (1), которые подтверждены одновременно для обоих вариантов реализации подач $s_п$ только для шести параметров из 48, а именно: $t_{5(1i)}$, $t_{50(1i)}$, $t_{55(2i)}$, $t_{60(2i)}$, $t_{75(2i)}$, S_{2i}, $i = \overline{1;2}$. Для эмпирических распределений (1), представленных в виде гистограмм на рис. 2, *а*,*б* для параметра $t_{50(1i)}$, $i = \overline{1;2}$, аппроксимация кривой Гаусса удовлетворяет принятию H_0 при следующих надёжностях в (2): α_{p1} =0,7 при $s_{п1}$ на двойной ход и α_{p2} =0,55 при $s_{п2}$ на одинарный проход. Вторая схема задания $s_{п2}$ (мм/ход) для остальных параметров микрорельефа надежно обеспечила нормальность распределений (1) поперечных высот, а первая - длин профиля $t_{p(d1)}$, $d = \overline{1;2}$, т.е. при шлифовании с подачей в мм/дв.ход. В целом, можно констатировать, что отсутствуют идеальные условия для использования параметрического метода статистики. По этой причине предпочтение отдано непараметрическому методу. Предварительно отметим, что оба направления статистик показали высокую эффективность и, за редким исключением, полное совпадение статистических гипотез по выбору $s_{пi}$, $i = \overline{1;2}$. Однако ожидаемые медианы $my_{di}, d = i = \overline{1;2}$, оказались несколько меньше своих параметрических аналогов, поскольку распределения (1) характеризуются положительной асимметрией. Для высотных параметров шероховатости это свидетельствует о благополучном повышении износостойкости БП сборных режущих инструментов, а по опорным длинам профиля $\hat{mt}_{p(di)}, d = i = \overline{1;2}$ – по *ISO* 13565, ведёт к усилению износа поверхности БП в

периоды приработки (p≤20%), снижению её несущей способности ($p \in (20\%;80\%]$) и увеличению вероятности усталостных разрушений ($p \in (80\%;100\%]$). С учётом отмеченного проанализируем результаты исследования, представленные на рис.3, *а*, *б* и в табл.1 для ряда важнейших параметров шероховатости. Знаком «*» в табл. указаны псевдокатегориальные величины (в дальнейшем КВ), регламентируемые ГОСтом 2789-73.

Установлено, что шлифование с поперечной подачей на ход продольного стола (i=2) обеспечивает снижение высотных параметров R_{ad2} , R_{maxd2} , $d = \overline{1;2}$, т.е. мер положения СВ в обоих направлениях изучаемого микрорельефа поверхности. Наиболее значимо это отразилось на мерах положения для всех рассматриваемых поперечных высотных параметров, включая R_{q12} и R_{z12}, по которым обычно регламентируется состояние микрогеометрии поверхности на рабочих чертежах деталей. В этом случае по отношению к схеме i=1 стабильно обеспечено снижение высот шероховатости на две КВ как по опытным $\bar{y}_{12}$, $\tilde{y}_{12}$, так и по их прогнозируемым величинам. В продольном сечении поверхности шероховатости изменились менее однозначно: для R_{a22} , R_{q22} – на две КВ, для R_{max22} – на одну КВ, для R_{z22} – в пределах КВ. На рис.3,*а* и в табл.1 приведены выборочные стандарты SD_{di} , $d = i = \overline{1;2}$, для параметрического

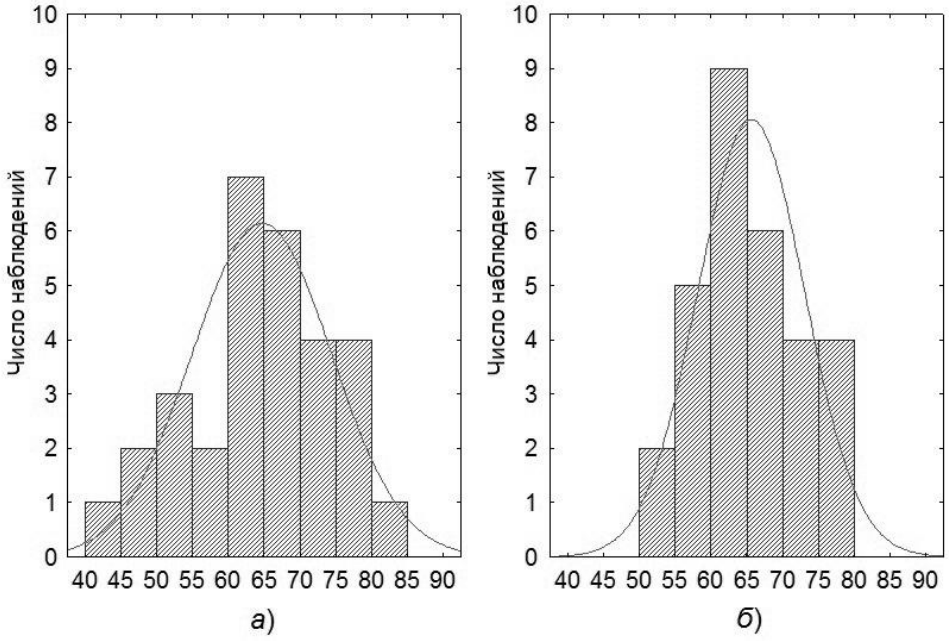


Рис.2. Гистограммы наблюдений (1) для параметра $t_{50(1i)}$, $i = \overline{1;2}$ ***, с наложением кривых нормального распределения: а –*** $s_{п1}$ ***, мм/дв.ход; б –*** $s_{п2}$ ***, мм/ход***

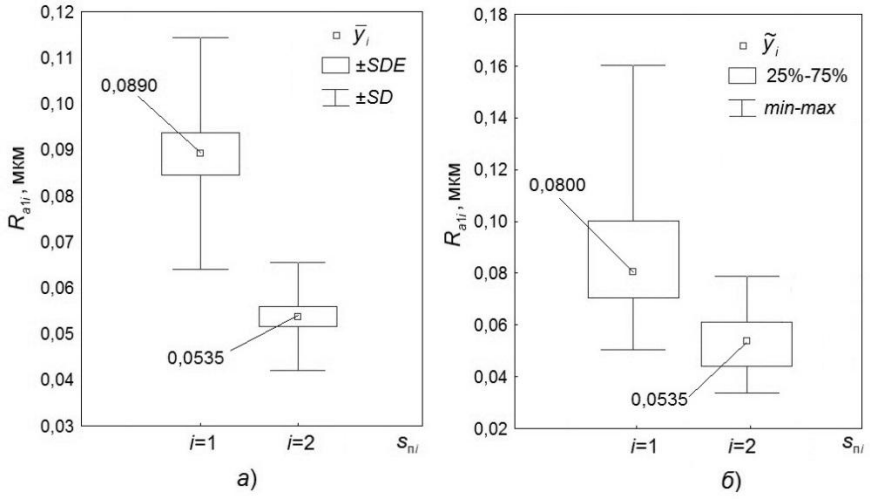


Рис.3. Описательные параметрические (а) и непараметрические (б) статистики для параметра R_{a1i} , $i = \overline{1;2}$ **:**

а – $s_{п1}$ ***, мм/дв.ход; б –*** $s_{п2}$ ***, мм/ход***

Таблица 1

Обоснование выбора схемы задания s_n по результатам статистической интерпретации (1)

Параметры	i	$\bar{y}_{di}$	SD_{di}	$\tilde{y}_{di}$	y_{di}	my_{di}
R_{a1i}, мкм	1	0,0890 (0,10*)	0,0252	0,0800 (0,08*)	0,0890 (0,10*)	0,0800 (0,08*)
	2	0,0535 (0,063*)	0,0117	0,0535 (0,063*)	0,0535 (0,063*)	0,0535 (0,063*)
R_{max1i}, мкм	1	0,5793 (0,63*)	0,1538	0,5650 (0,63*)	0,5793 (0,63*)	0,5650 (0,63*)
	2	0,3493 (0,40*)	0,0724	0,3532 (0,40*)	0,3493 (0,40*)	0,3530 (0,40*)
S_{1i}, мкм	1	5,9437 (6*)	0,4329	5,8400 (6*)	5,9437 (6*)	5,8400 (6)
	2	5,5104 (6*)	0,3671	5,4610 (6*)	5,5104 (6*)	5,4610 (6*)
S_{m1i}, мкм	1	52,9250 (63*)	14,0433	50,4700 (63*)	51,3210 (63,0*)	49,8540 (50,0*)
	2	49,7169 (50,0*)	9,1988	49,2388 (50,0*)		
$t_{10(1i)}$, %	1	3,9848	1,2592	3,8881	4,1929	3,9940
	2	4,3010	1,6862	4,0988		
$t_{30(1i)}$, %	1	26,9108	8,5845	27,3740	28,0956	26,5190
	2	29,2804	7,7189	25,6632		
$t_{90(1i)}$, %	1	97,6420	0,8310	97,9320	97,9837	97,9590
	2	98,0150	0,7120	97,9870		
R_{a2i}, мкм	1	0,0430 (0,05*)	1,2900	0,0400 (0,04*)	0,0430 (0,05*)	0,0400 (0,04*)
	2	0,0300 (0,032*)	0,9030	0,0290 (0,032*)	0,0300 (0,032*)	0,0290 (0,032*)
R_{max2i}, мкм	1	0,2360 (0,25*)	0,0710	0,2200 (0,25*)	0,2360 (0,25*)	0,2200 (0,25*)
	2	0,1810 (0,20*)	0,0400	0,1810 (0,20*)	0,1810 (0,20*)	0,1810 (0,20*)
S_{2i}, мкм	1	5,5110 (6*)	0,591	5,405 (6*)	5,4678 (6*)	5,4450 (6*)
	2	5,5240 (6*)	0,548	5,485 (6)		
S_{m2i}, мкм	1	83,780 (100*)	29,272	76,5300 (80*)	79,2089 (80*)	71,3370 (80*)
	2	74,6340 (80*)	31,111	66,1440 (80*)		
$t_{10(2i)}$, %	1	3,9610	1,962	3,7900	3,5467	3,7900
	2	3,1320	1,847	2,582		2,5820
$t_{30(2i)}$, %	1	18,8650	7,4480	17,5310	17,9042	23,5855
	2	16,9430	5,9350	16,452		
$t_{90(2i)}$, %	1	94,7160	2,0900	94,9740	94,952	95,1900
	2	94,8640	2,0310	95,1900		

Примечание: * указаны КВ по ГОСТ 2789-73; SD_{di}, $d = i = \overline{1;2}$, – выборочные стандарты отклонений (оценки σ_{di}).

метода, позволяющие оценить стабильность процесса. Для непараметрического метода меры рассеяния возрастают в 1,25 раза [3], поэтому их было решено опустить. На рис.3,*а* стандарты отклонений SD_{di} показаны в виде отрезков прямых относительно средних: $|\bar{y} \pm SD|_{d,i}$, а стандарты ошибок SDE_{di} – в виде прямоугольника. Для непараметрического метода меры рассеяния представлены двумя характеристиками: $|y_{0,75} - y_{0,25}|_{di}$ – интерквартильными широтами (в виде прямоугольника) и размахами $R_{di} = |y_{max} - y_{min}|_{di}$ – в виде отрезков прямых (рис.3,*б*). Величины мер рассеяния для обоих методов

свидетельствуют о том, что для высотных параметров шероховатости задание $s_п$ в мм/ход (*i*=2) ведёт к повышению стабильности процесса в 1,5–2 раза.

По данным А.Г. Суслова [1,8,9] при абразивном шлифовании инструментами (5-7)-ой структуры (нормальной пористости) соотношения между параметрами R_{q1}, R_{z1}, R_{max1} и R_{a1} не зависят от характеристики кругов и технологических элементов процесса. По этой причине их корреляционные связи представлены в первой строке табл.2 без указания характеристики абразивного инструмента и метода задания подачи $s_{пi}$, $i=\overline{1;2}$. Ниже в табл.2 расположены результаты [6], полученные при шлифовании БП из стали Р18 кругами нормальной (*j*=1) и высокой (*j*=2) пористости на режиме: $\upsilon_к$ =35 м/с, $s_{пр}$ =11 м/мин, $s_п$ =5 мм/дв.ход, *t*=0,0075 мм, *z*=0,15 мм, – путём сопоставления ожидаемых средних, предсказанных с привлечением моделей многомерного дисперсионного анализа. Установлено, что результаты шлифования кругами нормальной пористости *j*=1 при задании подачи $s_{п1}$ на двойной ход хорошо согласуются с результатами А.Г.Суслова Для абразивных кругов $j=\overline{2;3}$ выявлены отклонения от корреляционных связей [1,8,9], обусловленные как различной пористостью инструмента (10-я и 12-я структуры), так и методами $i=\overline{1;2}$ реализации поперечной подачи и её величинами. Для высокопористого инструмента *j*=3, используемого в данном исследовании, при схеме $i=1$ величина $s_{п1}$ была взята в 5 раз меньше, чем при шлифовании кругами 25AF46 M10 V5 – КФ40. Это привело к снижению корреляционного коэффициента K_{11} в (3) для параметра R_{z11} от 5,3-5,5 до 4,5. При этом для R_{max11} коэффициенты связи практически совпали. В то же время шлифование кругами 2 с подачей $s_{п1}$ =5 мм/дв.ход привело к росту коэффициентов K_{11} в (3) для параметров R_{z11}, R_{max11}, что обусловлено меньшей интерференцией шлифуемыми поверхностями БП с рабочей поверхностью кругов 2.

Для анализа высотных микронеровностей, рассматриваемых в направлении вектора $s_{пр}$, за начало отсчёта приняты коэффициенты K_{21} в (3), полученные при использовании абразивного круга 1 нормальной пористости и схемы $s_{п1}$. При тех же условиях проведения эксперимента для высокопористого круга 2 установлено превышение параметров $(y_u / R_a)_{21}$ (см. (3)) до 1,1–1,4 раза. Наибольшее значение коэффициента K_{21} =1,4 предсказано для параметра R_{max21}. Полученные результаты обусловлены ростом межзёренного пространства по сравнению с кругами (6-7)-ой структуры до 1,35 раза в результате выгорания фруктовых косточек с размерами основной фракции 0,4 мм при спекании брикетов. Для снижения тепловыделения крупные поры благоприятны, однако, как установлено в исследовании, ведут к ухудшению микрорельефа, особенно по наибольшим высотам профиля и, как результат, к снижению стойкости сборных режущих инструментов [4,8]. По этой причине высокопористые круги рекомендуется использовать на предварительном этапе шлифования или снижать крупность зёрен на 1–2 позиции [7]. В кругах 3, имеющих 12-ю структуру, используется другая порообразующая добавка, обеспечивающая более благоприятное соотношение между высотными характеристиками микрорельефа. Это получило подтверждение при использовании кругов близких характеристик: 25A F46 L10 V5 – КФ35 и 25A F60 M10 V5 – ПО – на операциях шлифования формообразующих поверхностей пресс-форм

Таблица 2

Влияние пористости кругов и метода задания поперечной подачи на корреляционные связи между однонаправленными высотными микронеровностями

Круги ($j=\overline{1;3}$)	Переменные $d,i=\overline{1;2}$	K_{di} по (3)		
		$\frac{mR_{qdi}}{mR_{adi}}$	$\frac{mR_{zdi}}{mR_{adi}}$	$\frac{mR_{\max di}}{mR_{adi}}$
— [1,8,9]	1●	-	5,50	6,70-7,00
25AF60 M6 V5 ($j=1$) [6]	11 21	1,40 1,40	5,30 5,30	7,00 9,30
25AF46 M10 V5 - КФ40 ($j=2$) [6]	11 21	1,30 1,60	6,20 5,90	8,90 13,00
25AF46 M12 V5 - ПО ($j=3$)	11 12 1●	1,38 1,26 1,32	4,50 4,28 4,39	7,06 6,54 6,80
	21 22 2●	1,12 1,21 1,16	3,00 3,52 3,26	5,50 6,24 5,87
K_{11}/K_{12} ($j=3$)		1,10	1,05	1,08
K_{21}/K_{22} ($j=3$)		0,83	0,85	0,88

из стали 40Х13. Сказанное было усилено одновременным снижением продольной подачи от 11 до 7 м/мин.

Приведённые в табл.2 сведения по выбору поперечных подач $s_{\text{п}i}$, $i=\overline{1;2}$, позволяют утверждать, что использование первого варианта ведёт к росту корреляционных коэффициентов K_{1i} в поперечном сечении поверхности БП в 1,05–1,1 раза и их снижению в ортогональном направлении. Решающим обстоятельством в пользу назначения $s_{\text{п}2}$ в мм/ход служит то, что поперечные высотные характеристики микрорельефа превышают свои продольные аналоги (табл.3).

Табл.3 иллюстрирует, что соотношения между разнонаправленными одноимёнными параметрами зависят от структуры круга и режима шлифования, включая технологический приём вариации с поперечной подачей. Как было указано выше, технологические параметры процесса при использовании кругов $j=\overline{1;2}$ соответственно нормальной и высокой пористости выбраны идентичными. В этих условиях величины коэффициентов K_{11} обусловлены исключительно характеристикой абразивного инструмента. Нами выявлено, что наибольшее различие до 2,1–2,9 раза между ожидаемыми средними y_{11} и y_{12} для исследуемых высотных параметров шероховатости показали абразивные инструменты 6-й структуры (*j*=1). В меньшей мере отмеченные закономерности проявились у круга 25АF46М10V5-КФ40 (*j*=2). По сравнению с предыдущим случаем при работе инструментом 3 (табл.3) с заданием подачи $s_{\text{п}1}$ увеличена структура от 10-й до 12-й, использована порообразующая ПО нового поколения, снижены величины подач $s_{\text{п}1}$ (от 5 до 1 мм/дв.ход) и $s_{\text{пр}}$ (от 11 до 7 м/мин). Новые условия шлифования привели к росту корреляционного коэффициента K_{11} в (4) для всех высотных параметров, за исключением средних арифметических отклонений неровностей. Установлено, что смена схемы задания подачи *i* от 1 до 2 ведёт к снижению коэффициента K_{1i} в 1,1-1,3 раза и повышает изотропность свойств поверхности БП, о чём свидетельствуют результаты, представленные в последней строке табл.3.

Прогнозируемые меры положения для шагов S_{di}, S_{mdi}, $d=i=\overline{1;2}$, практически не зависят от метода задания подачи $s_{\text{п}}$ и находятся в пределах одной КВ. По результатам интерпретации (1) с использованием обоих методов статистики шаги по выступам S_{di}, $d=i=\overline{1;2}$, попали в одну КВ=6 мкм. По средним шагам сказанное в полной мере относится только к способам задания подачи $i=\overline{1;2}$, а совпадение оценок по ожидаемым средним и медианам отмечено частично только для S_{m2} и mS_{m2}, которые представлены КВ=80 мкм. Одновременно следует подчеркнуть, что продольный шаг неровностей mS_{m2} оказался больше своего поперечного аналога на одну КВ, в силу чего он в большей мере снижает контактную прочность и виброустойчивость на базовых поверхностях БП сборного режущего инструмента [1]. Сказанное свидетельствует о целесообразности изучения микрорельефа в обоих направлениях $d=\overline{1;2}$. Установлено, что стабильность процесса по шагам $(S,S_m)_{di}$, $d=i=\overline{1;2}$, слабо коррелирована с методами задания поперечных подач.

Уровни сечений *p* – 10%, 30% и 90%, представленные в табл.1, выбраны с учётом требований к установочным базам в сборном режущем инструменте и к трём зонам опорных длин, отвечающих за различные эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей БП на всех этапах их износа (*ISO* 13565) [2]. Прежде всего следует отметить, что реализация схем подач $s_{\text{п}}$ не оказывает значимого воздействия

Таблица 3

Корреляционные связи между высотными параметрами шероховатости, расположенными в ортогональных сечениях

Круги ($j=\overline{1;3}$)	Переменные $i=\overline{1;2}$	K_{di} по (4)			
		$\frac{mR_{a1i}}{mR_{a2i}}$	$\frac{mR_{q1i}}{mR_{q2i}}$	$\frac{mR_{z1i}}{mR_{z2i}}$	$\frac{mR_{\max 1i}}{mR_{\max 2i}}$
25АF60 М6 V5 ($j=1$) [6]	1	2,80-2,90	2,20-2,30	2,80	2,10-2,2
25АF46 М10 V5 - КФ40 ($j=2$) [6]	1	2,00-2,10	1,60-1,70	2,20	1,40
25АF46 М12 V5 - ПО ($j=3$)	1 2 ●	2,00 1,86 1,93	2,44 1,94 2,19	3,00 2,26 2,63	2,57 1,95 2,26
$\frac{\left(my_1/my_2\right)_1}{\left(my_1/my_2\right)_2}(j=3)$		1,08	1,28	1,33	1,32

Примечание. Режимы шлифования указаны в исходных данных к табл. 2.

на опорные длины профиля, за исключением величин $\hat{mt}_{10(2i)}, i=\overline{1;2}$, из 19-ти проанализированных сечений $p \in [5\%;95\%]$. Установлено, что продольное направление для опорных длин профиля является регламентирующим в силу наименьших мер положения СВ [1,8,9]. Во всех случаях параметрические статистики предсказывают большие значения средних y_{pdi}, чем непараметрические $my_{pdi}, d=i=\overline{1;2}$, $p \in [5\%;95\%]$. В работах А.Г. Суслова утверждается, что при всех видах металлообработки, включая и шлифование, величины t_p не зависят от характеристики режущего инструмента и режимов шлифования. В частности, в [8] даны математические модели, которые позволили получить следующие ожидаемые величины по средним:

$$\hat{t}_{10}=2\%, \hat{t}_{30}=18\%, \hat{t}_{90}=98\%,$$

а в [9] они представлены соответственно в виде размахов: 1–3%, 16–20% и 97–99%. Направление *d* измерения опорных длин профиля не указано. По всей вероятности оно соответствует поперечному (*d*=1), в котором преимущественно изучается микрорельеф поверхности с учётом требований ГОСТа 2789-73. Тогда у высокопористых кругов, используемых в исследовании, они оказались в первых 2-х зонах по *ISO* 13565 несколько большими по сравнению с кругами 6–7 структуры, а в 3-ей зоне (*p*=80-95%), непосредственно влияющей на усталостную прочность БП [1,2], практически совпали. Сказанное в меньшей мере относится к продольному направлению *d*=2. На наш взгляд, результаты исследования в направлении подачи $s_{\text{п}}$ обусловлены возрастанием межзёренного пространства в кругах 12-ой структуры (*j*=3), которое привело к росту относительных опорных длин неровностей t_{p1}: *p*=10% – в 1,33-2 раза; *p*=30% – 1,33-1,65 раза. С удалением сечения *p* от вершин выступов R_{max1} влияние структуры круга ослабевает и при *p*=90% практически исчезает. В продольном сечении *d*=2 высокая скорость перемещения абразивных зёрен относительно шлифуемой поверхности БП сводит роль межзёренного пространства до нуля. В целом, возрастание t_p для высокопористых кругов по сравнению со стандартными на уровнях сечений профиля $p \in [20\%;80\%]$ является безусловным их преимуществом в плане увеличения площади контакта БП с деталью и виброустойчивости режущих инструментов, особенно при высокоскоростной обработке, а также лучшего теплоотвода из зоны резания.

По мерам рассеяния наблюдений (1) для параметров $t_{p(di)}$ получены наиболее нестабильные результаты. В дальнейшем ограничимся направлением *d*=1. Так, по всем критериям: SD_{1i}, R_{1i} и $|y_{0,75}-y_{0,25}|_{1i}$ – в сечениях на уровнях *p*: 30; 50–75%, отвечающих за несущую способность поверхности, наибольшую стабильность процесса шлифования обеспечила поперечная подача на одинарный ход стола станка. В условиях приоритета непараметрического метода меру рассеяния оценивали по минимуму интерквартильных широт $|y_{0,75}-y_{0,25}|_{1i}$, $i=\overline{1;2}$. Выявлено, что наиболее высокую воспроизводимость процесса шлифования в сечениях *p*: 25; 35; 40; 45; 80-90% – обеспечила подача в мм/дв.ход (*i*=1). В то же время параметрические оценки по SD_{1i}, размахам R_{1i}, $i=\overline{1;2}$, предпочтение отдали схеме шлифования с $s_{\text{п}}$ в мм/ход. Следовательно, использование параметрического метода на «чужом поле» [10] могло привести при нарушении условий 1, 2 на рис.1 к принятию неверных статистических оценок несмотря на высокую надёжность самих критериев.

Выводы

1. Раскрыта целесообразность использования статистических методов для обоснования метода задания поперечной подачи при плоском маятниковом шлифовании БП абразивными кругами высокой пористости. Сказанное прежде всего касается мер положения совокупностей шероховатости, а также стабильности технологического процесса при шлифовании операционной партии. Уместно подчеркнуть, что вторая параметрическая характеристика СВ может быть выявлена только при интерпретации экспериментальных данных с привлечением статистических методов. Использование двух характеристик СВ позволяет более аргументированно обосновать технологическое решение. Так, при равных мерах положения медиан решающим фактором становится лучшая воспроизводимость процесса шлифования.

2. С учётом нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений (1) предпочтение в исследовании отдано непараметрическому методу статистики, который до сих пор не нашёл широкого применения в технических приложениях. В этих условиях параметрические статистики неизбежно ведут к росту величин мер положения относительно их надёжных оценок, которые, за исключением параметра R_{a11}, не выходят за пределы одной КВ. Различие оценок мер положения по средним и медианам обусловлено положительной асимметрией распределений (1).

3. Показана целесообразность работы с поперечной подачей на ход стола (*i*=2), которая по сравнению с первым вариантом на двойной ход при равной производительности процесса на 5%-ном уровне значимости обеспечивает снижение высотных параметров R_{a1}, R_{q1} и R_{max1}, регламентирующих состояние микрорельефа, на три КВ, повышает его изотропность в 1,1–1,3 раза и стабильность процесса не менее чем в 1,5–2 раза.

4. Средние шаги и опорные длины профиля неровностей следует изучать в обоих направлениях и регламентировать на рабочих чертежах деталей. Для параметров $(S,S_m,t_p)_{di}$, $d=i=1;2$, не выявлена значимая роль метода задания поперечной подачи. Их ожидаемые величины находятся в пределах одной КВ или чаще представлены общей средней, а стабильность процесса характеризуется значимым рассеянием.

Библиографический список

1. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под ред. З.И.Кремня. СПб.: Политехника, 2007. 424 с.
3. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1982. 344 с.
4. Солер Я.И., Прокопьева А.В. Исследование влияния выхаживания на микрорельеф пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора // Обработка металлов. 2009. №1 (42). С. 24–27.
5. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Выбор абразивных кругов при плоском шлифовании деталей силового набора летательных аппаратов по критерию шероховатости поверхности // Вестник машиностроения. 2010. №5. С.55–64.
6. Солер Я.И. Статистические методы микрогеометрии поверхности при многопроходном шлифовании быстрорежущей стали абразивными высокопористыми кругами // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз.сб.науч.тр.; под ред. Г.С. Гуна. Магнитогорск: МГТУ, 2004. Вып. 31 С. 52–64.
7. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
8. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
9. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
10. Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики. М.: Финансы и статистика, 1983. 518 с.

УДК 621.87: 621.865.8: 51.74

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ФУНКЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ САМОХОДНОГО ГРУЗОПОДЪЕМНОГО КРАНА

В.С.Щербаков[1], М.С.Корытов[2], М.Ю.Архипенко[3]

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия,
644080, г. Омск, пр. Мира, 5.

Описывается методика определения временной функции изменения управляемых обобщенных координат грузоподъемного крана, выступающей в качестве важнейшего критерия оценки эффективности рабочего процесса. В качестве функции стоимости перемещений груза грузоподъемным краном из некоторого заданного начального положения в некоторое заданное конечное положение использовано интегральное полное время перемещения подвижных звеньев и груза. Использование методики открывает возможность синтеза оптимальной по временному критерию траектории перемещения груза в неоднородном пространстве конфигураций грузоподъемного крана. Предложенная методика позволяет минимизировать продолжительность производства работ.
Ил. 3. Библиогр. 2 назв.

Ключевые слова: временная функция; грузоподъемный кран; время перемещения; управляемые координаты.

METHODS FOR DETERMINING TIME CHANGE FUNCTION OF SELF-PROPELLED TRUCK CRANE CONTROLLED GENERALIZED COORDINATES

V.S. Shcherbakov, M.S. Korytov, M.Yu. Arkhipenko

Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI),
5 Mir Av., Omsk, 644080.

The paper describes the procedure to determine the time change function of the truck crane controlled generalized coordinates, serving as an important criterion for evaluating operation efficiency. The full integral travel time of crane moving parts and cargo is used as a cost function of cargo travel from a given initial position to a specified end position. Application of the procedure enables the synthesis of optimal by the time criteria trajectory of cargo travel in the inhomogeneous space of truck crane configurations. The proposed procedure allows to minimize the duration of work.
3 figures. 2 sources.

Key words: time function; truck crane; travel time; controlled coordinates.

Введение. Проблема оптимизации траектории перемещения объемного объекта в неоднородном организованном трехмерном пространстве по принятым критериям оптимальности является актуальной. В качестве подобных объектов выступают грузы, перемещаемые грузоподъемными кранами (ГПК), являю-

[1]Щербаков Виталий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета нефтегазовой и строительной техники, тел.: (3812)634038, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org
Shcherbakov Vitaly, Doctor of technical sciences, Professor, Dean of the Faculty of Oil and Gas and Construction Machinery, tel.: 8(3812)634038, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org
[2]Корытов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкционных материалов и специальных технологий, докторант, тел.: 89236725092, e-mail: kms142@mail.ru
Korytov Mikhail, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department Structural Materials and Special Technologies, Doctoral Candidate, tel.: 89236725092, e-mail: kms142@mail.ru
[3]Архипенко Маргарита Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики, тел.: 89136156517, e-mail: arkhipenko_m@sibadi.org
Arkhipenko Margarita, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics, tel.: 89136156517, e-mail: arkhipenko_m@sibadi.org