

УДК 621.923.1, 510.54.05

DOI 10.18698/0536-1044-2016-11-64-75

Классификация абразивных кругов по топографии шлифованной поверхности пластин Р9М4К8 с привлечением кластерного анализа

Я.И. Солер, Ван Кань Нгуен, Д.Ю. Казимиров

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

The Classification of Abrasive Wheels by Topography of the Ground Surface of R9M4K8 Plates Using Cluster Analysis

Y.I. Soler, Nguyen Van Canh, D.Y. Kazimirov

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



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

i В современном машиностроении часто возникает проблема классификации изделий по различным признакам. В данном исследовании для формирования групп абразивных кругов по качеству шлифованной поверхности пластин Р9М4К8 при плоском шлифовании привлечен иерархический кластерный анализ. Режущие способности кругов характеризовала топография поверхности деталей, учитывающая параметры шероховатости, отклонения от плоскостности и микротвердость по мерам положения и рассеяния. Установлено, что для классификации абразивных инструментов целесообразно выделить три кластера: 1 — 5NQ46I6VS3, 5SG46K12VXP, TGX80I12VCF5, 25AF46K10V5-ПО3, 5A46L10VAX, EKE46K3V, 34AF60K6V5; 2 — 5SG60K12VXP, 5SG46I12VXP, 25AF46M12V5-ПО3, 92A/25AF46L6V20; 3 — 25AF46M12V5-ПО, 25AF46M10V5-ПО3, 25AF60M10V5-ПО, 25AF46M10V5-ПО3, 25AF46L10V5-КФ35. Выявлено, что при шлифовании пластин Р9М4К8 круги первого кластера обеспечивают наименьшие параметры шероховатости и отклонения от плоскостности, а круги третьего кластера улучшают параметры микротвердости и отклонения от плоскостности.

Ключевые слова: шлифование, абразивные круги, кластерный анализ, классификация, расстояние (метрика), дендограмма, схема объединения.

i Modern engineering often faces the problem of product classification according to various criteria. In this study, the authors used hierarchical cluster analysis to form groups of abrasive wheels based on the quality of ground surface of R9M4K8 plates. The wheel cutting capabilities were evaluated by surface topography of the parts. Roughness parameters, deviations from flatness, and microhardness with regards to location and dispersion were taken into consideration. It was established that abrasive tools could be classified into three clusters: 1 — 5NQ46I6VS3, 5SG46K12VXP, TGX80I12VCF5, 25AF46K10V5-PO3, 5A46L10VAX, EKE46K3V, 34AF60K6V5; 2 — 5SG60K12VXP, 5SG46I12VXP, 25AF46M12V5-PO3, 92A/25AF46L6V20; 3 — 25AF46M12V5-PO, 25AF46M10V5-PO3, 25AF60M10V5-PO, 25AF46M10V5-PO3, 25AF46L10V5-KF35. It was determined that the

wheels of the first cluster provided the smallest parameters of roughness and deviation from flatness when grinding R9M4K8 plates, while the wheels of the third cluster improved the parameters of microhardness and the deviation from flatness.

Keywords: grinding, abrasive wheels, cluster analysis, classification, distance (metric), dendrogram, combining circuit.

В настоящее время на мировом рынке представлены абразивные инструменты, производимые несколькими сотнями заводов [1]. Это вызывает жесткую конкуренцию и, как следствие, непрерывное улучшение их качества. Признанным лидером среди них является *Saint-Gobian Abrasive* — крупнейший в мире производитель абразивно-алмазного инструмента, в состав которого входят четыре компании: *Winter* (160 лет на рынке), *Norton* (125 лет), *Carborundum* (120 лет) и *Merit Abrasive* (60 лет) [2]. В России функционирует 15 абразивных заводов, крупнейшими и старейшими среди которых являются Лужский абразивный завод (110 лет), Петербургский абразивный завод «Ильич» (138 лет) и Московский абразивный завод (86 лет).

Все абразивные круги классифицируются по различным признакам: форме, геометрическим размерам, виду и марке абразивного материала, зернистости, твердости, структуре, связке, классам точности и неуравновешенности [3–5]. Во всех ранее проведенных исследованиях и нормативных документах отсутствует интегральная классификация режущих способностей (РС) абразивных инструментов по всему комплексу выходных переменных процесса. В основном на практике решаются частные задачи, исключающие возможность получения годных деталей, удовлетворяющих всем служебным требованиям. Подходом к решению интегральных требований служит кластерный анализ (КА), который получил развитие в последние годы в связи с возможностью компьютерной обработки больших баз данных [6].

КА предполагает выделение компактных, удаленных друг от друга групп объектов, «естественное» разбиение совокупности на области скопления. Его используют, когда исходные данные представлены в виде матриц близости или расстояний между объектами, либо в виде точек в многомерном пространстве. Наиболее распространены множества второго вида, для которых КА ориентирован на выделение некоторых геометрически удаленных групп, внутри которых объекты близки. Этот метод позволяет учитывать эффект существенной многомерно-

сти данных; дает возможность лаконичного и более простого формирования многомерных структур; вскрывает объективно существующие, непосредственно не наблюдаемые закономерности с помощью полученных факторов или главных компонент [6–8].

Цель работы — группирование абразивных кругов по качеству шлифованных поверхностей с привлечением КА, суть которого состоит в последовательном объединении меньших кластеров или в разделении их на меньшие. Такой подход к оценке РС абразивных кругов является инновационным. Однако его практически не используют в машиностроении, хотя он может снизить трудоемкость разработки нормативов по режимам резания и технологических рекомендаций, в частности, по шлифованию штампов и быстрорежущих инструментов. КА и обработка экспериментальных данных проведены с привлечением программы *Statistica 6.1.478.0*.

Методика проведения исследования. Методика включает в себя три последовательно выполняемых этапа: описание условий проведения натурального эксперимента; интерпретацию экспериментальных данных с привлечением статистических методов и их кластеризацию.

Условия проведения натурального эксперимента. Опыты проведены периферией абразивного круга по схеме маятникового шлифования при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3Г71; технологические параметры — скорость резания $v_k = 35$ м/с, продольная подача $s_{пр} = 7$ м/мин, поперечная подача $s_n = 1$ мм/двойной ход, глубина резания $t = 0,015$ мм, межпереходный припуск $z = 0,15$ мм; СОЖ — 5%-ная эмульсия Аквол 6 (ТУ 0258-024-0014842-98), подаваемая поливом на заготовку с расходом $7 \dots 10$ л/мин; объект исследования — образцы цилиндрической формы (диаметр $D = 30$ мм и высотой $H = 40$ мм) из быстрорежущей стали Р9М4К8, торец которых служил шлифуемой поверхностью; число дублирующих опытов $n = 30$ ($v = 1; 30$). Образцы имитировали быстрорежущие пластины (БП) сборных инструментов: торцовых, дисковых, концевых фрез и т. п.

Как будет показано ниже, интерпретация наблюдений проведена с привлечением статистических методов. В этом случае выходной параметр процесса шлифования в общем виде целесообразно представить переменной величиной $\{y_{eqv}\}$, в которой индексы « eqv » несут в сжатой и удобной форме следующую информацию: e — характеристики кругов; q — одномерные распределения частот; v — количество параллельных опытов. При этом нечетные индексы ($q = 1, 3, 5, \dots$) отражают меры положения для каждого параметра топографии поверхности, а четные ($q = 2, 4, 6, \dots$) — соответствующие меры рассеяния для того же параметра качества поверхности БП.

Характеристики исследуемых кругов $e = \overline{1; 16}$: 1 — 5NQ46I6VS3, 2 — 5SG46K12VXP, 3 — 5SG60K12VXP, 4 — 5SG46I12VXP, 5 — TGX80I12VCF5, 6 — 25AF46M12V5-ПО, 7 — 25AF46M12V5-ПО3, 8 — 25AF46M10V5-ПО3, 9 — 25AF46M10V5-ПО3, 10 — 25AF46K10V5-ПО3, 11 — 25AF60M10V5-ПО, 12 — 25AF46L10V5-КФ35, 13 — 5A46L10VAX, 14 — ЕКЕ46K3V, 15 — 92A/25AF46L6V20, 16 — 34AF60K6V5.

Основными признаками для оценки топографии поверхности БП по результатам статистической обработки экспериментальных данных, приведенной ниже, выбраны: параметры шероховатости [9–11], расположенные параллельно вектору s_{np} , — R_{a1} (\tilde{y}_{e1} , КШ $_{e2}$), R_{z1} (\tilde{y}_{e3} , КШ $_{e4}$), R_{max1} (\tilde{y}_{e5} , КШ $_{e6}$), S_{m1} (\tilde{y}_{e7} , КШ $_{e8}$), $t_{20(1)}$ (\tilde{y}_{e9} , КШ $_{e10}$), $t_{50(1)}$ (\tilde{y}_{e11} , КШ $_{e12}$), $t_{85(1)}$ (\tilde{y}_{e13} , КШ $_{e14}$), R_{a2} (\tilde{y}_{e15} , КШ $_{e16}$), R_{z2} (\tilde{y}_{e17} , КШ $_{e18}$), R_{max2} (\tilde{y}_{e19} , КШ $_{e20}$), S_{m2} (\tilde{y}_{e21} , КШ $_{e22}$), $t_{20(2)}$ (\tilde{y}_{e23} , КШ $_{e24}$), $t_{50(2)}$ (\tilde{y}_{e25} , КШ $_{e26}$), $t_{85(2)}$ (\tilde{y}_{e27} , КШ $_{e28}$), — и расположенные параллельно вектору s_{np} , — отклонения от плоскостности [12] — EFE_{max} (\tilde{y}_{e29} , КШ $_{e30}$), EFE_a (\tilde{y}_{e31} , КШ $_{e32}$), EFE_q (\tilde{y}_{e33} , КШ $_{e34}$) и микротвердость HV (\tilde{y}_{e35} , КШ $_{e36}$) [13]. Методики их измерения и расчетов представлены в работах [14, 15].

Методика интерпретации экспериментальных данных с привлечением статистических методов. Учитывая неустойчивость процесса шлифования и случайную природу формирования топографии поверхности инструментов, наблюдения целесообразно представить в виде множеств

$$\{y_{eqv}\}, \quad (1)$$

элементами которых служат независимые случайные величины (СВ).

Множества (1) следует проанализировать с привлечением статистических методов, разделяемых на параметрические и непараметрические, в частности ранговые. Характеристиками одномерного распределения частот для множеств (1) служат [16–18]: для первого направления — средние $\bar{y}_{eq} = y_{eq\bullet}$, стандарты отклонений $(SD)_{eq}$, размахи $R_{eq} = |y_{\max} - y_{\min}|_{eq}$; для второго направления — медианы \tilde{y}_{eq} , квартильные широты $КШ_{eq} = |y_{0,75} - y_{0,25}|_{eq}$, охватывающие 50 % наблюдений (1). Первая частота для обеих статистик характеризует меру положения (опорное значение), а последующие — меры рассеяния (прецизионность).

Каждое из направлений статистики имеет «свое поле» для эффективного использования в технике. В частности, параметрический метод требует однородности дисперсий и нормальности распределений (1). В противном случае следует воспользоваться непараметрическими статистиками, свободными от каких-либо ограничений, накладываемых на СВ [16, 17]. Критерии и результаты тестирования при шлифовании рассмотрены в работах [19, 20]. Практика шлифования показала, что в полном объеме требования к СВ параметрического метода не выполняются, поэтому в данном исследовании использован его конкурент из непараметрической статистики. В связи с этим переменные шлифования приведены для медиан и квартильных широт.

Методика проведения кластерного анализа. При реализации КА множества $G = \{G_{eq}\}$, $e = \overline{1; 16}$, $q \in [1; 36]$ следует разделить на $K \geq 1$ кластеров (подмножеств) из соображений, чтобы каждый объект G_{eq} принадлежал одному и только одному подмножеству, а объекты, включенные в разные кластеры, находились в своих генеральных совокупностях. Разбиение на кластеры должно удовлетворять условию оптимальности, отражающему уровни желательности. Их называют целевыми функциями, которые при некотором наборе ограничений стремятся к минимуму.

Методика проведения КА включает в себя следующие последовательно проводимые этапы: стандартизацию данных, определение расстояния между объектами и расстояния между кластерами.

Стандартизация переменных. Признаки могут быть отражены в разных параметрах и единицах, что исключает возможность выразить расстояния между ними. Они должны

быть преобразованы в безразмерные величины [6, 7]. В работе использованы преобразования следующего вида:

$$z_{eq} = [(\tilde{y}_e - \tilde{y}_\bullet) / \sigma_{(\tilde{y})}]_q, \quad q = 1, 3, \dots, 35; \quad (2)$$

$$z_{e;q+1} = [(KШ_e - KШ_\bullet) / \sigma_{(KШ)}]_{q+1}, \quad q = 2, 4, \dots, 36, \quad (3)$$

где \tilde{y}_\bullet и $KШ_{\bullet(q+1)}$ — средние медиан и квартильных широт для кругов $e = \overline{1; 16}$ по одному из параметров топографии поверхности; $\sigma_{(\tilde{y}_q)}$ и $\sigma_{(KШ_{q+1})}$ — среднеквадратические отклонения \tilde{y}_{eq} и $KШ_{e(q+1)}$.

Определение расстояния (метрики) между объектами. В КА для количественной оценки сходства введено понятие расстояния (метрики). Сходство для классифицируемых объектов устанавливается в зависимости от метрического расстояния между ними. Таким образом, расстояния между парами векторов $d(z_{i\bullet}, z_{j\bullet})$, $(i, j) \in \overline{1; 16}$, $q \in \overline{1; 36}$ могут быть представлены в виде матрицы расстояний:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2j} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Расстоянием между объектами называется такая неотрицательная вещественная функция, которая удовлетворяет выражениям: $d_{ij} \geq 0$, $d_{ij} = d_{ji}$, $d_{ij} + d_{jc} \geq d_{ic}$ и $d_{ii} = 0$.

Основными способами определения расстояния между объектами являются: линейное расстояние, Евклидово расстояние, квадрат Евклидова расстояния, обобщенное степенное расстояние Минковского, расстояние Чебышева, манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов). В данном исследовании использована последняя функция расстояний, поскольку она считается более мощной [6–8].

Манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов) определяется как сумма абсолютных разностей по координатам для двух объектов i и j :

$$d_M(z_i, z_j) = \sum_{k=1}^q |z_{ki} - z_{kj}|, \quad (i, j) \in \overline{[e = \overline{1; 16}]}. \quad (5)$$

Иерархические алгоритмы КА могут быть двух типов — агломеративные и дивизионные.

В агломеративных процедурах начальным является разбиение, состоящее из K одноэлементных классов, а конечным — из одного класса; в дивизионных — наоборот. Принцип работы иерархических агломеративных (дивизионных) алгоритмов состоит в последовательном объединении (разделении) групп элементов, т. е. в создании иерархической структуры классов. Обычно такая классификация представляется в виде дендограммы — графика, отражающего последовательное объединение двух кластеров в один с указанием расстояний между ними.

Определение расстояния между кластерами. На первом шаге, когда каждый объект представляет собой отдельный кластер, расстояния между этими объектами определяются выбранной мерой. Однако когда связываются вместе несколько объектов, возникает вопрос, как следует определять расстояние между кластерами, т. е. необходимо имеет правило объединения или связи для двух кластеров.

Существует множество методов объединения кластеров: расстояние «ближайшего соседа», расстояние «дальнего соседа», невзвешенное попарное среднее, взвешенное попарное среднее, невзвешенный центроидный метод, взвешенный центроидный (медиана) метод и метод Варда [6–8]. В данном исследовании использован метод Варда, в котором в качестве целевой функции применяют внутригрупповую сумму квадратов отклонений. Последняя есть не что иное, как сумма квадратов расстояний между каждым объектом и средней по кластеру, содержащему этот объект. На каждом шаге объединяются такие два кластера, которые приводят к минимальному увеличению целевой функции, т. е. внутригрупповой суммы квадратов (SS). Этот метод направлен на объединение близко расположенных кластеров.

Результаты и их обсуждение. Проверка (1) на однородность дисперсий множеств $e = \overline{1; 16}$ проведена по критериям ($m = \overline{1; 3}$): 1 — Левене, 2 — Хартли, Кохрена и Бартлетта, 3 — Брауна-Форсайта. В программе статистики $m = 2$ объединены в одну группу.

Дисперсии наблюдений (1) считаются однородными, если нуль-гипотезы H_0 приняты при уровне значимости $\alpha_{em} < 0,05$. Вероятностный характер гипотез не исключает того, что отдельные решения f , принятые по критериям $m = \overline{1; 3}$, могут различаться. Поэтому окончательные результаты по гомогенности H_0 или

неоднородности H_1 дисперсий отклонений проведены из условий H_0 при $f_0 \in [2; 3]$ или H_1 при $f_1 \in [2; 3]$, где решениям присвоены индексы принятых гипотез [21]. Выявлено, что по критериям $m = 1; 3$ для всех показателей качества поверхности нуль-гипотезы H_0 относительно гомогенности дисперсий множеств (1) отклонены (табл. 1).

Законы распределения наблюдений проанализированы с привлечением статистики Шапиро — Уилка, по которой при уровне надежности $\alpha_{eq} > 0,5$ нуль-гипотезы H_0 считаются принятыми. Законы распределения (1) проверены по всем показателям в отдельности для каждого абразивного круга. Таким образом, общее количество анализируемых ситуаций составило $N = 18 \times 16 = 288$. По результатам тестирования установлено, что гипотеза H_0 принята в 51-м случае, что отражено в табл. 2 и 3 подчеркнутыми жирными цифрами. Следует отметить, что использование одних и тех же экспериментальных данных в условиях различного порядка их суммирования приводит к различным оценкам

их отклонений от нормального распределения. В связи с изложенным принято считать, что «своим полем» для интерпретации (1) служит непараметрический метод статистики, который характеризуется медианами и КШ.

Параметры качества деталей измерены в разных единицах: в мкм для шероховатости и макроотклонений; в процентах для относительной опорной длины и в МПа для микротвердости. Нормирование их размерности проведено с использованием инструмента «Стандартизовать» в программном пакете Statistica: *Открыть файл данных/Данные/Стандартизовать*. После вызова строки «Стандартизовать» на экране компьютера появляется окно задания параметров нормирования данных: *переменные* — выбираются все 36 признаков; *наблюдения* — для всех 16 абразивных кругов. Полученные нормированные признаки по соотношениям (2), (3) для пяти первых кругов $e = 1; 5$ представлены в полном объеме в табл. 4. Нормированные признаки остальных кругов в целях сокращения объема исключены из текста исследования.

Таблица 1

Результаты проверки однородности дисперсий для множеств $e = \overline{1; 16}$

Параметр	Расчетный уровень значимости α_{em} при $m = \overline{1; 3}$			Принятие H_0
	1	2	3	
R_{a1}	1,000000	1,000000	1,000000	—
R_{z1}	1,000000	1,000000	1,000000	—
R_{max1}	1,000000	1,000000	1,000000	—
S_{m1}	0,016031	1,000000	0,121014	—
$t_{20(1)}$	0,032115	0,997048	0,062333	—
$t_{50(1)}$	0,155142	0,115088	0,269043	—
$t_{85(1)}$	0,099490	1,000000	0,201989	—
R_{a2}	1,000000	1,000000	1,000000	—
R_{z2}	1,000000	1,000000	1,000000	—
R_{max2}	1,000000	1,000000	1,000000	—
S_{m2}	0,999985	1,000000	0,009185	—
$t_{20(2)}$	0,031791	0,998266	0,099425	—
$t_{50(2)}$	0,731558	0,905136	0,787546	—
$t_{85(2)}$	0,187099	0,999992	0,535905	—
EFE_{max}	1,000000	1,000000	1,000000	—
EFE_a	1,000000	1,000000	1,000000	—
EFE_q	1,000000	1,000000	1,000000	—
HV	1,000000	1,000000	1,000001	—

Таблица 2

Проверка нормальности распределений высотных параметров и микротвердости по критерию Шапиро — Уилка

Круг	Расчетный уровень значимости α_{eq}								
	Параметры								
	R_{a1}	R_{z1}	R_{max1}	S_{m1}	R_{a2}	R_{z2}	R_{max2}	S_{m2}	HV
1	0,0927	0,1762	0,0325	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,1539
2	0,0138	0,7260	0,0748	0,0572	0,0010	0,0003	0,0079	0,0564	0,2489
3	0,0003	0,0086	0,0141	0,0470	0,0000	0,2906	0,0196	0,0000	0,5124
4	0,0158	0,3915	0,1649	0,0076	0,0000	0,0144	0,0022	0,0153	0,0315
5	0,1007	0,0711	0,1087	0,0262	0,0828	0,0426	0,8377	0,0931	0,0083
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009	0,0000	0,0015	0,0005	0,0000	0,0625
7	0,0024	0,0000	0,0010	0,0381	0,0010	0,0823	0,8489	0,0169	0,1912
8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0738	0,0001	0,0000	0,0000	0,0002	0,1203
9	0,0028	0,0053	0,0139	0,1189	0,0000	0,0000	0,0000	0,0249	0,5495
10	0,6451	0,8589	0,1805	0,0001	0,0007	0,0645	0,0362	0,0114	0,2717
11	0,0008	0,0395	0,0259	0,0000	0,0010	0,0000	0,0009	0,0002	0,0041
12	0,0000	0,0002	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0002	0,0597	0,0147
13	0,4443	0,9112	0,8263	0,0092	0,0001	0,0001	0,0069	0,0004	0,0452
14	0,8061	0,2511	0,8306	0,6136	0,0011	0,1414	0,1250	0,0001	0,7603
15	0,0000	0,7401	0,9018	0,0378	0,0046	0,0166	0,0030	0,0000	0,2596
16	0,0852	0,0101	0,0052	0,0252	0,0001	0,2852	0,5112	0,0000	0,9049

Примечание. Круги: 1 — 5NQ46I6VS3, 2 — 5SG46K12VXP, 3 — 5SG60K12VXP, 4 — 5SG46I12VXP, 5 — TGX80I12VCF5, 6 — 25AF46M12V5-ПО, 7 — 25AF46M12V5-ПО3, 8 — 25AF46M10V5-ПО3, 9 — 25AF46M10V5-ПО3, 10 — 25AF46K10V5-ПО3, 11 — 25AF60M10V5-ПО, 12 — 25AF46L10V5-КФ35, 13 — 5A46L10VAX, 14 — EKE46K3V, 15 — 92A/25AF46L6V20, 16 — 34AF60K6V5.

Таблица 3

Результаты проверки нормальности распределений параметров относительной опорной длины и макроотклонений по критерию Шапиро — Уилка

Круг	Расчетный уровень значимости α_{eq}								
	Параметры								
	$t_{20(1)}$	$t_{50(1)}$	$t_{85(1)}$	$t_{20(2)}$	$t_{50(2)}$	$t_{85(2)}$	EFE_{max}	EFE_a	EFE_q
1	0,4522	0,3253	0,0286	0,0467	0,7767	0,0702	0,0789	0,0047	0,0045
2	0,0000	0,6514	0,2094	0,0011	0,2290	0,0310	0,1378	0,7122	0,6646
3	0,0936	0,1310	0,0041	0,0022	0,3749	0,2215	0,0147	0,6178	0,8517
4	0,1514	0,7894	0,0002	0,0248	0,9763	0,0629	0,0038	0,6287	0,2120
5	0,9203	0,7886	0,1168	0,0212	0,0748	0,8179	0,0017	0,0190	0,0048
6	0,2936	0,5980	0,0043	0,1136	0,2908	0,0827	0,0009	0,0000	0,0000
7	0,1331	0,6624	0,0000	0,0138	0,9754	0,0228	0,0126	0,0686	0,0272
8	0,0044	0,0654	0,5919	0,0490	0,7273	0,0894	0,0173	0,0368	0,1697
9	0,1270	0,1411	0,8523	0,6665	0,2570	0,0527	0,0002	0,0091	0,0013
10	0,5695	0,4254	0,5461	0,0554	0,3789	0,6803	0,0038	0,0921	0,0929
11	0,0071	0,0675	0,0000	0,0009	0,6200	0,1640	0,0026	0,0039	0,0064
12	0,2590	0,7338	0,0001	0,0445	0,9424	0,6875	0,0002	0,0286	0,0116
13	0,1063	0,8369	0,0225	0,0463	0,7930	0,5839	0,0000	0,2092	0,5832
14	0,1846	0,3743	0,0000	0,4926	0,1940	0,0000	0,0100	0,3356	0,9060
15	0,9891	0,2950	0,0006	0,8922	0,3484	0,0006	0,0030	0,3224	0,2324
16	0,0061	0,6966	0,0415	0,0156	0,1544	0,0094	0,0582	0,0558	0,0609

Примечание. Круги 1–16 — то же, что в табл. 2.

Таблица 4

Нормированные признаки для кругов $e = \overline{1; 5}$

Признак $q = \overline{1; 36}$	Наблюдаемый объект									
	1		2		3		4		5	
	$z_{1q}(\bar{y})$	$z_{1q}(\text{КШ})$	$z_{2q}(\bar{y})$	$z_{2q}(\text{КШ})$	$z_{3q}(\bar{y})$	$z_{3q}(\text{КШ})$	$z_{4q}(\bar{y})$	$z_{4q}(\text{КШ})$	$z_{5q}(\bar{y})$	$z_{5q}(\text{КШ})$
$R_{a1} (1,2)$	-0,967	-0,335	-1,059	-0,465	-0,909	-0,443	-0,992	-0,403	-0,684	-0,425
$R_{z1} (3,4)$	-0,966	-0,435	-1,005	-0,563	-0,641	-0,366	-0,743	-0,458	-0,787	-0,344
$R_{\max 1} (5,6)$	-0,901	-0,304	-1,054	-0,404	-0,726	-0,369	-0,774	-0,417	-0,627	-0,481
$S_{m1} (7,8)$	0,801	0,759	0,544	-0,862	-0,788	0,219	-1,202	0,162	1,962	2,447
$t_{20(1)} (9,10)$	0,387	0,306	-0,261	-0,795	1,883	1,054	-0,978	1,132	0,867	0,034
$t_{50(1)} (11,12)$	0,076	0,890	0,404	-0,425	1,288	1,661	-0,403	0,508	0,058	-0,363
$t_{80(1)} (13,14)$	-0,940	0,662	-0,103	1,567	1,694	-0,544	1,942	-1,261	-0,122	0,111
$R_{a2} (15,16)$	-1,131	-0,375	-1,038	-0,446	-0,127	-0,756	0,245	-0,518	-0,945	-0,762
$R_{z2} (17,18)$	-1,235	-0,432	-1,128	-0,547	0,428	-0,578	0,715	-0,107	-1,006	-0,886
$R_{\max 2} (19,20)$	-1,194	-0,278	-1,048	-0,686	0,042	-0,365	0,178	-0,220	-0,939	-0,830
$S_{m2} (21,22)$	-0,742	-1,575	-0,135	-0,626	-0,775	-0,521	-0,492	1,012	-0,902	-0,176
$t_{20(2)} (23,24)$	-1,075	-1,249	-0,610	-1,156	-1,036	-0,171	-0,445	0,317	-1,038	-0,032
$t_{50(2)} (25,26)$	-1,112	-0,152	-0,660	-2,243	-0,693	-1,152	0,109	-0,301	-0,712	-0,080
$t_{80(2)} (27,28)$	-0,114	0,605	-0,317	-0,512	-1,008	1,425	-0,024	0,905	-1,543	-0,292
$EFE_{\max} (29,30)$	-0,149	-0,931	-0,149	-0,280	1,361	-0,410	-0,653	0,890	0,354	1,410
$EFE_a (31,32)$	0,729	-1,406	0,837	-0,615	1,189	0,609	-0,922	-0,445	0,052	2,346
$EFE_q (33,34)$	0,410	-1,392	0,653	-0,597	1,074	0,228	-1,026	-0,002	0,164	2,408
$HV (35,36)$	0,770	0,068	-0,170	-0,737	-0,030	-0,723	0,064	-1,128	-1,598	1,702

Примечание. Наблюдаемые объекты — круги 1–5 — то же, что в табл. 2.

Таблица 5

Матрица манхэттенского расстояния

e	e															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,0	18,9	29,2	32,7	30,3	46,6	33,1	47,0	56,6	27,9	45,8	67,9	17,8	24,8	36,4	25,4
2	18,9	0,0	29,1	32,7	30,8	44,6	30,9	47,7	56,7	26,6	45,2	61,8	18,0	23,5	35,6	23,7
3	29,2	29,1	0,0	24,6	34,1	46,1	29,8	51,0	51,3	38,8	47,3	58,1	21,9	33,7	40,7	29,1
4	32,7	32,7	24,6	0,0	39,2	33,5	24,6	36,8	46,0	28,6	34,5	54,0	32,1	34,9	39,6	33,0
5	30,3	30,8	34,1	39,2	0,0	53,7	36,9	53,4	59,2	34,8	44,4	65,4	22,7	31,4	46,7	31,5
6	46,6	44,6	46,1	33,5	53,7	0,0	39,5	24,8	49,7	33,2	34,9	52,0	45,5	38,4	48,9	49,9
7	33,1	30,9	29,8	24,6	36,9	39,5	0,0	36,6	38,0	24,1	32,4	45,0	31,8	33,4	27,3	29,7
8	47,0	47,7	51,0	36,8	53,4	24,8	36,6	0,0	43,1	29,6	24,7	52,2	48,7	40,6	49,5	52,9
9	56,6	56,7	51,3	46,0	59,2	49,7	38,0	43,1	0,0	47,1	43,3	33,8	54,6	52,2	56,2	59,7
10	27,9	26,6	38,8	28,6	34,8	33,2	24,1	29,6	47,1	0,0	35,6	59,2	29,3	22,5	36,9	30,7
11	45,8	45,2	47,3	34,5	44,4	34,9	32,4	24,7	43,3	35,6	0,0	49,7	46,1	44,2	43,8	43,6
12	67,9	61,8	58,1	54,0	65,4	52,0	45,0	52,2	33,8	59,2	49,7	0,0	61,9	69,2	62,2	61,9
13	17,8	18,0	21,9	32,1	22,7	45,5	31,8	48,7	54,6	29,3	46,1	61,9	0,0	23,5	37,2	21,1
14	24,8	23,5	33,7	34,9	31,4	38,4	33,4	40,6	52,2	22,5	44,2	69,2	23,5	0,0	39,5	30,7
15	36,4	35,6	40,7	39,6	46,7	48,9	27,3	49,5	56,2	36,9	43,8	62,2	37,2	39,5	0,0	32,3
16	25,4	23,7	29,1	33,0	31,5	49,9	29,7	52,9	59,7	30,7	43,6	61,9	21,1	30,7	32,3	0,0

Примечание. Круги e — то же, что в табл. 2.

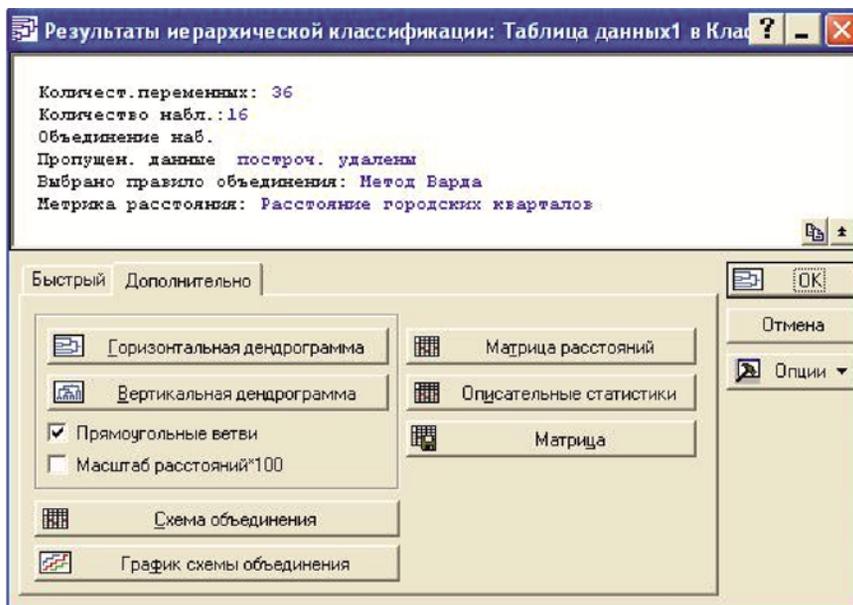


Рис. 1. Диагональное окно с результатами классификации

Таблица 6

Схема объединений: манхэттенское расстояние, метод Варда

$d_{об}$	Номер объекта в каждом шаге кластеризации															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Код абразивного круга $e = \overline{1;16}$															
17,76	1	13														
18,70	1	13	2													
22,47	10	14														
24,58	4	7														
24,66	8	11														
26,00	1	13	2	16												
28,08	3	4	7													
31,59	6	8	11													
33,61	1	13	2	16	5											
33,77	9	12														
37,40	1	13	2	16	5	10	14									
40,63	3	4	7	15												
53,69	1	13	2	16	5	10	14	3	4	7	15					
73,24	6	8	11	9	12											
128,24	1	13	2	16	5	10	14	3	4	7	15	6	8	11	9	12

Примечание. Круги e — то же, что в табл. 2.

По выражению (5) получены расстояния d_{Mij} по всем строкам и столбцам матрицы (4), которые представлены соответственно в табл. 5. Полученные в табл. 5 расстояния (5) подлежат кластеризации, для чего в программе необходимо вызвать модуль «кластерный анализ» через меню: *Анализ/Многомерный разведочный*

анализ/Кластерный анализ. Далее выбираем метод кластеризации — иерархическая классификация. При этом появляется диалоговое окно кластеризации иерархическим методом с характеристиками: *переменные* — все признаки для анализа; *файл данных* — исходные данные; *объекты* — наблюдения (строки); *правило*

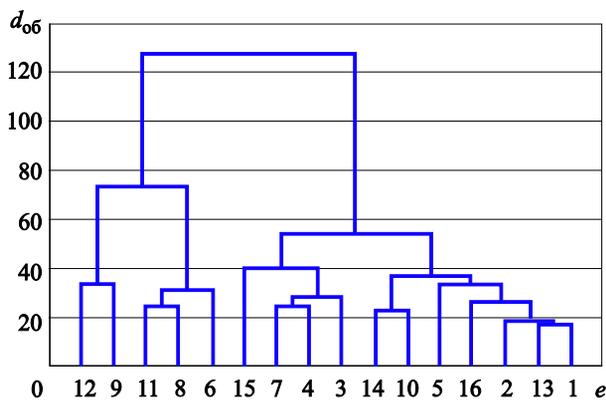


Рис. 2. Вертикальная дендограмма наблюдаемых объектов, полученная с помощью метода Варда и манхэттенского расстояния (5)

объединения — метод Варда; мера близости — манхэттенское расстояние; удаление пропущенных данных — замена средних или построчное удаление. После установки всех необходимых параметров для проведения кластеризации щелчком кнопки «ОК» и получим окно с результатами классификации (рис. 1).

В программе на первом этапе использовали вертикальную дендограмму (рис. 2) и схемы объединения (табл. 6). На рис. 2 по оси абсцисс представлены наблюдаемые объекты — коды кругов $e = 1; 16$, а по оси ординат — расстояния объединений. В табл. 6 первый столбец содержит расстояния объединений $d_{об}$ объектов в соответствующем кластере. Каждая строка в таблице характеризует состав кластера на выполняемом шаге.

На рис. 2 представлена дендограмма наблюдаемых объектов при методе Варда и манхэттенском расстоянии. Она иллюстрирует, что на первом шаге были объединены круги $e = 1; 13$. Расстояния между ними характеризует смещение кластеров $d_{(1;13)} = 17,76$ (см. рис. 2 и табл. 6). На последнем этапе в кластер входят все круги

$e = 1; 16$ с расстоянием 128,24. При числе кластеров $K = 2$ в первый «сгусток» вошли круги $e = 1; 5; 7; 10; 13; 16$, а во второй — $e = 6; 8; 9; 11; 12$. При $K = 3$ первый кластер формируют инструменты $e = 1; 2; 5; 10; 13; 14; 16$ с расстоянием объединения 37,4; второй — $e = 3; 4; 7; 5$ (расстояние 40,63), а третий — $e = 6; 8; 9; 11; 12$ (расстояние 73,24). При $K = 4$ первый кластер формируют круги $e = 6; 8; 11$ с расстоянием объединения 31,59, второй — $e = 9; 12$ (расстояние 33,77), третий — $e = 1; 2; 5; 10; 13; 14; 16$ (расстояние 37,40), четвертый — $e = 3; 4; 7; 5$ (расстояние 40,63). Предпочтительно использовать количество кластеров, равное трем-четырем, так как при большем их числе теряется наглядность кластеризации.

Для оценки итогов КА общее количество признаков ($q = 36$) сократим до трех, которые являются наиболее значимыми в повышении надежности деталей: R_{a1} , EFE_{max} и HV (табл. 7). В скобках приведены категориальные величины (КВ) для параметра R_{a1} [21] и качество точности TFE для показателя отклонений от плоскостности EFE_{max} [22]. Таким образом, получены следующие кластеры: первый — $e = 1; 2; 5; 10; 13; 14; 16$; второй — $e = 3; 4; 7; 5$; третий — $e = 6; 8; 9; 11; 12$.

Интегральную оценку РС кругов $e = 1; 16$ по кластерам сделать сложно, поэтому проведем ее дифференцированно по каждому параметру топографии. По высотам шероховатостей первый кластер ($e = 1; 2; 5; 10; 13; 14; 16$) показал наименьшее значение КВ = 0,058 (0,063) мкм, на втором месте расположен кластер 2 ($e = 3; 4; 7; 5$) — $R_{a1} 0,061(0,063)$. Третий кластер для кругов $e = 6; 8; 9; 11; 12$ характеризуется $R_{a1} = 0,089(0,100)$. Этот кластер показал наилучшие РС кругов по точности формы и микротвердости обработанной поверхности — 14,75 мкм ($TFE7$) и 8799,07 МПа. По отклонениям от

Таблица 7

Групповые средние значения параметров R_{a1} , EFE_{max} и HV

Кластер $K = \overline{1;3}$	R_{a1} , мкм	EFE_{max} , мкм	HV , МПа
1	0,058 (0,063)	15,14 (TFE7)	7468,42
2	0,061 (0,063)	16,25 (TFE8)	7750,95
3	0,089 (0,100)	14,75 (TFE7)	8799,07

Примечание. Кластеры: 1 — 5NQ46I6VS3, 5SG46K12VXP, TGX80I12VCF5, 25AF46K10V5-ПО3, 5A46L10VAX, EKE46K3V, 34AF60K6V5; 2 — 5SG60K12VXP, 5SG46I12VXP, 25AF46M12V5-ПО3, 92A/25AF46L6V20; 3 — 25AF46M12V5-ПО, 25AF46M10V5-ПО3, 25AF60M10V5-ПО, 25AF46M10V5-ПО3, 25AF46L10V5-КФ35.

плоскостности кластеры 1 и 3 находятся в пределах одного множества $TFE7$, но наблюдаемое значение $EFE_{max} = 15,14$ мкм для первого кластера в 1,03 раза больше, чем для третьего. По микротвердости они составили следующую убывающую последовательность: 1, 2, 3. Из табл. 7 видно, что по двум параметрам топографии поверхности (EFE_{max} , HV) бесспорным лидером является третий кластер ($e = 6; 8; 9; 11; 12$). По двум показателям (EFE_{max} , R_{a1}) первый кластер предсказал наилучшие РС. Окончательный выбор кругов необходимо согласовать с требованиями к режущим инструментам.

Выводы

1. Представлена методика классификации абразивных инструментов с привлечением иерархического кластерного анализа. Ее достоинствами являются: низкая трудоемкость, эко-

логическая безопасность, возможность широкого использования в любых производственных условиях и эффективность при обработке больших баз данных.

2. В проведенном исследовании при шлифовании пластин P9M4K8 выделены три кластера: первый — $e = 1; 2; 5; 10; 13; 14; 16$; второй — $e = 3; 4; 7; 5$; третий — $e = 6; 8; 9; 11; 12$. Оценка РС кругов между кластерами требует дополнительных исследований, например, с привлечением статистических методов, нечеткой логики, нейронной сети и т. д. Установлено, что круги первого кластера обеспечивают наименьшие параметры шероховатости и отклонения от плоскостности, а круги третьего кластера улучшают параметры микротвердости и отклонения от плоскостности. Окончательный выбор кругов следует согласовать с требованиями к режущим инструментам.

Литература

- [1] Webster J., Tricard M. Innovation in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2004, vol. 54, is. 2, pp. 597–617.
- [2] Пилинский А.В. Современные тенденции применения и развития процессов шлифования в США. *Вектор науки ТГУ*, 2012, № 4(22), с. 191–196.
- [3] ГОСТ Р 52381–2005. *Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава*. Введен 2006–07–01. Москва, Стандартинформ, 2005. 15 с.
- [4] ГОСТ 3647–80. *Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля*. Введен 1982–01–01. Москва, Изд-во стандартов, 2004. 19 с.
- [5] ГОСТ Р 52587–2006. *Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твердости*. Введен 2008–01–01. Москва, Стандартинформ, 2007. 12 с.
- [6] Мандель И.Д. *Кластерный анализ*. Москва, Финансы и статистика, 1988. 176 с.
- [7] Буреева Н.Н. *Многомерный статистический анализ с использованием ППП STATISTICA*. Нижний Новгород, Изд-во ННГУ, 2007. 112 с.
- [8] Anderberg M.R. *Cluster Analysis for Application*. New York, Academic Press, 1973. 359 p.
- [9] ГОСТ 25142–82. *Шероховатость поверхности. Термины и определения*. Введен 1982–02–18. Москва, Изд-во стандартов, 1982. 22 с.
- [10] Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В. *Инженерия поверхности деталей*. Москва, Машиностроение, 2008. 320 с.
- [11] ISO 1365–3: 2000. *Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Surfaces having stratified functional properties. Part 3: Height characterization using the material probability curve*. Geneva, International Standard, 2000. 20 p.
- [12] ГОСТ 24642–81. *Допуски формы и расположения поверхности. Основные термины и определения*. Введен 1981–07–01. Москва, Изд-во стандартов, 1981. 68 с.
- [13] ГОСТ 9450–76. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников*. Введен 1977–01–01. Москва, Изд-во стандартов, 1993. 36 с.
- [14] Солер Я.И., Нгуен В.К. Прогнозирование эффективности шлифования кругами различной пористости из традиционных и новых абразивов по критерию точности формы пластин P9M4K8. *Вестник ИргТУ*, 2014, № 11(94), с. 49–58.
- [15] Soler Ya.I., Van Canh N. Microhardness of High-Speed P12Ф3K10M3 Steel plates in pendulum grinding by the periphery of abrasive wheels. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, № 10, pp. 785–791.

- [16] Sachs L. *Applied Statistics: A Handbook of Techniques*. New York, Springer-Verlag, 1984. 707 p.
- [17] Hollander M., Wolfe D.A., Chicken E. *Nonparametric statistical methods*. New York, John Wiley & Sons, 2014. 844 p.
- [18] ГОСТ Р ИСО 5726–2002. *Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерения. Ч.1. Основные понятия и определения*. Введен 2002–11–01. Москва, Изд-во стандартов, 2002. 24 с.
- [19] Солер Я.И., Нгуен В.К. Прогнозирование микрорельефа стальных инструментов при шлифовании кругами из хромистого электрокорунда. *Научное обозрение*, 2014, № 11, с. 123–130.
- [20] Soler Ya.I., Nguyen V.C. Prediction form accuracy of plane toolware in pendulum grinding by Norton Altos wheels. *Japanese Education and Scientific Review*, 2015, № 1(9), vol. 11, pp. 794–805.
- [21] ГОСТ 2789–73. *Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения*. Введен 1975–01–01. Москва, Изд-во стандартов, 1973. 10 с.
- [22] ГОСТ 24643–81. *Допуски формы и расположения поверхности. Числовые значения*. Введен 1981–01–07. Москва, Изд-во стандартов, 1981. 14 с.

References

- [1] Webster J., Tricard M. Innovation in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2004, vol. 54, is. 2, pp. 597–617.
- [2] Pilinskii A.V. Sovremennye tendentsii primeneniia i razvitiia protsessov shlifovaniia v SShA [Modern tendencies of applications and developing grinding processes in USA]. *Vektor nauki TGU* [Vector of sciences. Togliatti State University]. 2012, no. 4(22), pp. 191–196.
- [3] GOST R 52381–2005. *Materialy abrazivnye. Zernistost' i zernovoi sostav shlifoval'nykh poroshkov. Kontrol' zernovogo sostava* [State Standard R 52381–2005. Abrasive materials. Grain size and grain structure of grinding powders. Control of grain composition]. Moscow, Standartinform publ., 2005. 15 p.
- [4] GOST 3647–80. *Materialy shlifoval'nye. Klassifikatsiia. Zernistost' i zernovoi sostav. Metody kontroliia* [State Standard 3647–80. Polishing materials. Classification. Grain and grain structure. Control methods]. Moscow, Standartinform publ., 2004. 19 p.
- [5] GOST R 52587–2006. *Instrument abrazivnyi. Oboznacheniiia i metody izmereniia tverdosti* [State Standard R 52587–2006. Abrasive tool. Indications and methods of measuring hardness]. Moscow, Standartinform publ., 2007. 12 p.
- [6] Mandel' I.D. *Klasternyi analiz* [Cluster analysis]. Moscow, Finansy i statistika publ., 1988. 176 p.
- [7] Bureeva N.N. *Mnogomernyi statisticheskii analiz s ispol'zovaniem PPP STATISTICA* [Multivariate statistical analysis using STATISTICA IFR]. Nizhny Novgorod, NNSU publ., 2007. 112 p.
- [8] Anderberg M.R. *Cluster Analysis for Application*. New York, Academic Press, 1973. 359 p.
- [9] GOST 25142–82. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniia* [State Standard 25142–82. The surface roughness. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform publ., 1982. 22 p.
- [10] Suslov A.G., Bez'iazychnyi V.F., Panfilov Iu.V. *Inzheneriia poverkhnosti detalei* [Engineering details surface]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 320 p.
- [11] ISO 1365–3: 2000. *Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Surfaces having stratified functional properties. Part 3: Height characterization using the material probability curve*. Geneva, International Standard, 2000. 20 p.
- [12] GOST 24642–81. *Dopuski formy i raspolozheniia poverkhnosti. Osnovnye terminy i opredeleniia* [State Standard 24642–81. Tolerances of form and surface location. Basic terms and definitions]. Moscow, Standartinform publ., 1981. 68 p.
- [13] GOST 9450–76. *Izmerenie mikrotverdosti vдавlivaniem almaznykh nakonechnikov* [State Standard 9450–76. Measurement of microhardness indentation of diamond tips]. Moscow, Standartinform publ., 1993. 36 p.
- [14] Soler Ya.I., Nguyen V.C. Prognozirovanie 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* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 11(94), pp. 49–58.
- [15] Soler Ya.I., Van Canh N. Microhardness of High-Speed R12F3K10M3 Steel plates in pendulum grinding by the periphery of abrasive wheels. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 10, pp. 785–791.
- [16] Sachs L. *Applied Statistics: A Handbook of Techniques*. New York, Springer-Verlag, 1984. 707 p.
- [17] Hollander M., Wolfe D.A., Chicken E. *Nonparametric statistical methods*. New York, John Wiley & Sons, 2014. 844 p.
- [18] GOST R ISO 5726–2002. *Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniia. Ch.1. Osnovnye poniatiia i opredeleniia* [State Standard R ISO 5726–2002. Accuracy (trueness and precision) of methods and measurement results. Part 1. Basic concepts and definitions]. Moscow, Standartinform publ., 2002. 24 p.
- [19] Soler Ya.I., Nguyen V.C. Prognozirovaniie mikrorel'efa stal'nykh instrumentov pri shlifovanii krugami iz khromistogo elektrokورونا [Forecasting the micro-relief of steel instruments during grinding with chrome electrocorundum wheels]. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review]. 2014, no. 11, pp. 123–130.
- [20] Soler Ya.I., Nguyen Van Canh. Prediction form accuracy of plane toolware in pendulum grinding by Norton Altos wheels. *Japanese Education and Scientific Review*, 2015, no. 1(9), vol. 11, pp. 794–805.
- [21] GOST 2789–73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniiia* [State Standard 2789–73. The roughness of the surface. Parameters, characteristics and identification]. Moscow, Standartinform publ., 1973. 10 p.
- [22] GOST 24643–81. *Dopuski formy i raspolozheniia poverkhnosti. Chislovye znacheniiia* [State Standard 24643–81. Tolerances of form and arrangement of the surface. Numeric values]. Moscow, Standartinform publ., 1981. 14 p.

Статья поступила в редакцию 23.06.2016

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

КАЗИМИРОВ Денис Юрьевич (Иркутск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

Information about the authors

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

NGUYEN Van Canh (Irkutsk) — Postgraduate, Department of Technology and Equipment of Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: vancanh.vn@mail.ru).

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