

# ВЫБОР АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 ПО ВЫСОТНЫМ ПАРАМЕТРАМ ШЕРОХОВАТОСТИ

*Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент  
Д.Ш. МАЙ, аспирант  
(ИрНИТУ, г. Иркутск)*

Поступила 19 июня 2015

Рецензирование 17 июля 2015

Принята к печати 20 октября 2015

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

Шлифование деталей из титановых сплавов используется намного реже, чем других конструкционных материалов, что не отвечает запросам машиностроительного производства. Причина сказанного связана с налипанием стружки на рабочие поверхности абразивных инструментов из карбида кремния и электрокорунда. Это обусловлено высокой адгезионной активностью между титаном и традиционными абразивами при рабочих температурах резания. Радикальным средством решения данной проблемы служит использование при шлифовании титановых сплавов высокопористых кругов (ВПК) из кубического нитрида бора марки CBN30, 100 %-й концентрации на связке V (K27) с порообразующей КФ40, в которых варьировались зернистость: В76, В126, В151 (ГОСТ Р 53922–2010) и твердость: М, О (ГОСТ Р 52587–2006). Дополнительно были испытаны круги *Norton* из карбида кремния зеленого нормальной пористости 39С (46, 60) К8 VK, различающиеся по зернистостям. С учетом случайного характера процесса шлифования, нарушений однородности дисперсий и нормальности распределений интерпретация наблюдений шероховатостей проведена с привлечением непараметрического метода статистики, характеристиками которого служат медианы и квартильные широты. Установлено, что варьирование переменных процесса для каждой группы инструментов признано незначимым по мерам положения. Круги *Norton* обеспечивают снижение высот шероховатостей в 1,6... 1,7 раза по сравнению с нитридборовыми ВПК. Их рекомендовано использовать на чистовом этапе шлифования, а ВПК CBN30 – на предварительном для снижения теплового воздействия на деталь. По стабильности процесса первое место занимают круги *Norton* с зернистостью 46, а среди нитридборовых – CBN30 В76 100 OV К27 – КФ40.

**Ключевые слова:** шлифование, титановый сплав, шероховатость, статистика, среднее, медиана, мера рассеяния.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-18-30

## Введение

Титановые сплавы обладают уникальной комбинацией свойств: высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью в самых разнообразных средах и жаропрочностью. Они востребованы в авиационной и космической технике, газоперекачивающей аппаратуре, хи-

мическом оборудовании и судостроении [1, 2]. При этом титановые сплавы имеют один существенный недостаток – низкую обрабатываемость абразивным инструментом, в связи с чем до сих пор удельный вес шлифования титановых деталей намного ниже, чем стальных. Сказанное сдерживает технический прогресс в машиностроении [2–4].

Титановый сплав VT22 относится к двухфазным ( $\alpha + \beta$ ). Большое содержание в нем  $\beta$ -стабилизаторов: 11,8 %, что позволяет проводить эффективную термическую обработку (закалку+старение). В таком состоянии детали VT22 входят в группу высокопрочных титановых сплавов ( $\sigma_B > 1000$  МПа), которая характеризуется самой низкой обрабатываемостью шлифованием [3, 5].

Причинами низкой шлифуемости заготовок из титана являются адгезионное и диффузионное взаимодействие между абразивными и обрабатываемыми материалами, а также интенсивное засаливание рабочей поверхности абразивного инструмента. К основным направлениям повышения обрабатываемости титановых деталей следует отнести: применение инертных и износостойких абразивных зерен; использование высокопористых кругов (ВПК); создание в зоне шлифования реакционной среды, способствующей пассивации металла и, как следствие, уменьшению его взаимодействия с абразивным материалом [2–19].

По результатам работ установлено, что при шлифовании титановых заготовок традиционными абразивами предпочтение следует отдать карбидам кремния. Это связано с тем, что титан интенсивно отдает электроны атомам алюминия в корунде, вызывая адгезионный износ электрокорундовых зерен. Адгезионное взаимодействие с карбидом кремния отмечено менее интенсивным, чем с электрокорундом. Свойства титана, влияющие на его взаимодействие с абразивными материалами, отражаются на их износостойкости. Так, для сплава VT22 износостойкость карбида кремния относительно корундовых материалов более двух раз [5]. Информация по выбору зерен карбидов кремния зеленого и черного носит частный характер и требует дополнительного исследования в каждом конкретном случае. Абразивными материалами, атомы которых не принимают электроны титана и тем самым сводят адгезию к минимуму, являются кубический нитрид бора (КНБ) и алмаз. Засаливание рабочей поверхности кругов вызвано низкими антифрикционными свойствами титана, который имеет малую износостойкость и высокую склонность к схватыванию при трении. Тонкая окисная пленка легко разрушается, поскольку является более

хрупкой, чем нижележащий материал, что обусловлено диффузией водорода, кислорода и азота при температурах шлифования, начиная с 400...600 °С [5].

Качество поверхности деталей из сплава VT22 оцениваем по высотам шероховатостей, которые являются наиболее значимыми характеристиками ее топографии. Их формируют следующие первичные величины [20; 21, с. 41–46]:

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

где  $h_1$  – составляющая профиля, отражающая кинематический перенос геометрических характеристик рельефа рабочей поверхности инструмента на заготовку (слепок);  $h_2$  – составляющая, возникающая в результате колебания круга и заготовки вследствие разновысотности и хаотического расположения зерен в связке;  $h_3$  – составляющая, обусловленная пластической деформацией поверхности при врезании зерен в металл;  $h_4$  – составляющая адгезионного взаимодействия зерен с заготовкой;  $h_5$  – составляющая их упругих деформаций в черепке круга.

По мнению В.А. Носенко, доминирующей составляющей в (1) служит  $h_1$ , а все остальные  $h_m$ ,  $m = 2; 5$ , являются вторичными величинами [3]. Установлено, что радиус режущей части зерен зависит не только от их материала, но и от глубины внедрения в металл. С увеличением глубины царапины отдельные мелкие риски сливаются в одну большую [22].

Наиболее слабым звеном в технологической системе процесса шлифования является абразивный круг. В то же время в рассмотренных публикациях акцент сделан на другие технологические приемы и условия шлифования, а круг дан без должного обоснования. По этой причине решено остановиться на выборе зернистости нитридборовых (CBN) ВПК и кругов Norton стандартной пористости, а также дополнительно изучить влияние твердости ВПК CBN на шероховатость поверхности. Учитывая чувствительность сплава VT22 к концентраторам напряжений, считаем целесообразным оптимизировать характеристики кругов по критерию шероховатости деталей с учетом наибольшей высоты профиля.

## 1. Методика исследования

### 1.1. Условия проведения эксперимента

Оборудование, форма и размеры инструментов, режимы шлифования приведены в табл. 1.

В условиях эксперимента подача  $s_{\text{п}}$  выбрана на двойной ход, поэтому имеет смысл пояснить их функциональное назначение. Опускание круга на глубину вели в момент смещения продольного стола в крайнее левое положение относительно оператора. В связи с этим перемещение стола слева направо считаем рабочим. Срезание металла с поверхности протекало по схеме встречного шлифования, поскольку круг имеет вращение по часовой стрелке. Тогда обратное движение стола вместе с заготовкой в преде-

лах заданной подачи  $s_{\text{п}}$  становится выхаживающим, формирующим микрорельеф поверхности. Учитывая, что величина  $s_{\text{п}}$  меньше высоты абразивного инструмента, оставшаяся рабочая поверхность круга обеспечивает выхаживание поверхности в обоих направлениях продольного перемещения стола. Но и в этом случае завершающий проход инструмента протекал в условиях попутного шлифования. Схема врезания круга выбрана по результатам исследования [3], в котором заготовки титановых сплавов обрабатывали в условиях глубинного (однопроходного) шлифования и получали снижение высот шероховатостей на одну категориальную величину (КВ) [25] по сравнению с альтернативной схемой встречного шлифования.

Таблица 1

Основные условия проведения эксперимента

| Станок | Круг           | Форма и размеры          | Технологические параметры |                 |                |      |     |
|--------|----------------|--------------------------|---------------------------|-----------------|----------------|------|-----|
|        |                |                          | $v_{\text{к}}$            | $s_{\text{пр}}$ | $s_{\text{п}}$ | $t$  | $z$ |
| 3Е711В | ВПК <i>CBN</i> | 1А1 200×20×76×5, мм [23] | 28                        | 6               | 4              | 0,01 | 0,1 |
| 3Г71   | <i>Norton</i>  | 01 250×20×76, мм [24]    | 35                        |                 |                |      |     |

Примечание:  $v_{\text{к}}$  – скорость круга, м/с;  $s_{\text{пр}}$  – продольная подача, м/мин;  $s_{\text{п}}$  – поперечная подача, мм/дв.ход;  $t$  – глубина резания, мм;  $z$  – операционный припуск, мм

Заготовками служили образцы из титанового сплава ВТ22 ( $\sigma_{\text{в}} = 1200$  МПа,  $\delta = 8...12$  %,  $E = 115$  ГПа [1]) с размерами  $B \times L \times H = 40 \times 40 \times 50$  мм, шлифуемые по плоскости  $B \times L$  без выхаживания. СОЖ – 5 %-я эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин. Число дублирующих опытов –  $n = 30$  ( $\nu = \overline{1; 30}$ ). Переменные условия шлифования представлены кодом « $dijv$ », удобным для анализа выходных параметров процесса с использованием статистических методов. В данном случае индекс  $d = 1; 2$  отражает направление расположения шероховатости: 1 – параллельно вектору  $s_{\text{п}}$ , 2 – параллельно вектору  $s_{\text{пр}}$ . Характеристики кругов закодированы индексом  $i = \overline{1; 6}$ : 1 – CBN30 В76 100 OV К27-КФ40; 2 – CBN30 В126 100 MV К27-КФ40; 3 – CBN30 В126 100 OV К27-КФ40; 4 – CBN30 В151 100 OV К27-КФ40; 5 – 39С 46 К8 VK; 6 – 39С 60 К8 VK. ВПК  $i = \overline{1; 4}$  относятся к нитридовым инструментам [23, 26], в которых варьировались зернистость от В76 (200/250\*) до

В151 (100/120\*) и твердость от М (средней) до О (среднетвердой). Знаком «\*» представлены зернистости в мешах. Круги *Norton*  $i = 5, 6$  из зерен карбида кремния зеленого 8-й структуры (обычной пористости) имеют среднемягкую твердость (К) и различались зернистостями: 46 (355...300 мкм) и 60 (300...250 мкм) по ISO 8486-1, где в скобках указаны размеры зерен основной фракции. Индекс  $j = \overline{1; 3}$  использован в коэффициентах стабильности, которые рассмотрены ниже для различных мер рассеяния: 1 – по  $SD_{di}$ , 2 – по  $R_{di}$ , 3 – по  $KШ_{di}$ .

Параметры шероховатости [27]: ( $R_a, R_q, R_z, R_{\text{max}}$ ) $_{di}$  – измерены с помощью системы на базе профилографа – профилометра модели 252 завода «Калибр».

### 1.2. Статистическая интерпретация экспериментальных данных

Учитывая неустойчивость процесса шлифования и случайную природу формирования шероховатостей, анализ наблюдений ведем с

привлечением статистических подходов. Рассматриваем их случайными величинами (СВ), образующими независимые множества

$$\{y_{iv}\}, i = \overline{1;6}, v = \overline{1;30}. \quad (2)$$

В технических приложениях используются параметрические и непараметрические методы статистики (например, ранговые). Характеристиками одномерного распределения частот для множества (2) служат [28–30]: для первого направления – средние  $y_i = y_{i\bullet}$ , стандарты отклонений  $(SD)_i$ , размахи  $R_i = |y_{\max} - y_{\min}|_i$ ; для второго направления – медианы  $\tilde{y}_i$ , квартильные широты  $KШ_i = |y_{0,75} - y_{0,25}|_i$ , охватывающие 50 % наблюдений множества (2). Первая частота характеризует меру положения (опорное значение), а последующие – меры рассеяния (прецизионность). Сдвиги  $\tilde{y}_i$  относительно  $y_{i\bullet}$  обусловлены асимметрией (скошенностью) кривых распределений и находятся из выражений

$$As_i = [3(y_{i\bullet} - \tilde{y}_i) / SD]_i. \quad (3)$$

Каждый метод статистики имеет свою область рационального применения. Для параметрического метода необходимо, чтобы множества (2) удовлетворяли требованиям нормальности и гомоскедастичности распределений (синонимы – однородность и гомогенность дисперсий). Второе ограничение, накладываемое на множества (2), должно выполняться наиболее строго. В противном случае точные параметрические оценки могут привести к принятию неверных гипотез. При нарушении оговоренных требований к СВ следует воспользоваться непараметрическим методом, который не связан со свойствами конкретного семейства распределений. Проведение одномерного дисперсионного анализа (ОДА) и множественного поиска ожидаемых опорных значений  $(\hat{y}_{i\bullet}, \hat{m}\hat{y}_i)_i, i = \overline{1;6}$  связано с большим объемом вычислений, в силу чего обе процедуры выполнены с использованием программы *Statistica 6.1.478.0* [31; 32].

Влияние непараметрического метода на меры положения оценивается медианными коэффициентами при неизменных  $d = 1$  (ограничились основным направлением для высотных шероховатостей) и  $i = \overline{1;6}$ :

$$K_{M1i} = (\tilde{y} / y_{i\bullet})_{1i}, \quad (4)$$

$$\overline{K}_{M1i} = (m\hat{y} / \hat{y}_{i\bullet})_{1i}. \quad (5)$$

Оценку работоспособности кругов  $i = \overline{2;6}$  относительно базового ВПК СBN30 В76 100 ОV К27-КФ40 ( $i = 1$ ) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот множества (2) в поперечном направлении [28; 31; 32]:

$$K_{1i} = (\tilde{y}_i / \tilde{y}_1)_{1i}, \quad (6)$$

$$\overline{K}_{1i} = (m\hat{y}_i / m\hat{y}_1)_{1i}, \quad (7)$$

$$K_{CT1i1} = (SD_1 / SD_i)_{1i}, \quad (8)$$

$$K_{CT1i2} = (R_1 / R_i)_{1i}, \quad (9)$$

$$K_{CT1i3} = (KШ_1 / KШ_i)_{1i}. \quad (10)$$

## 2. Результаты исследования и их обсуждение

### 2.1. Выбор статистического метода интерпретации множества (2)

Тестирование множества (2) на однородность дисперсий (нуль-гипотез  $H_0$ ) проведено для восьми параметров шероховатости в двух направлениях  $d = \overline{1;2}$  при работе кругами  $i = \overline{1;6}$ , для чего были привлечены три группы критериев ( $\omega = \overline{1;3}$ ): 1 – Хартли, Кохрена, Бартлетта (в программе представлены одной совокупностью), 2 – Левене, 3 – Брауна–Форсайта. По результатам тестирования  $H_0$  принималась, если количество решений в ее пользу составляло  $f_0 \in [2; 3]$ . Установлено, что для шероховатостей  $(R_q, R_z, R_{\max})_2$  в продольном направлении  $H_0$  приняты при  $f_0 = 3$ . В ортогональном направлении  $d = 1$  для первой группы критериев  $\omega = 1$  все  $H_0$  приняты с незначительной ошибкой 2-го рода. По остальным статистикам  $\omega = 2,3$  гомогенность дисперсий подтверждена для параметров  $R_{q1}(\omega = 2; 3)$  и  $R_{q1}(\omega = 3)$  при наличии ошибок 2-го рода.

Гипотезы о нормальности распределений множества (2) по кругам  $i = \overline{1;6}$  и параметрам шероховатости приняты по критерию Шапиро–Уилка при выполнении неравенств:  $\alpha_i > 0,5$ . Результаты тестирования представлены в табл. 2.



**Проверка множества (2) на нормальность распределений по кругам и параметрам шероховатости**

| Круг<br>$i = \overline{1;6}$ | $\alpha_i$ |          |          |              |          |          |          |              |
|------------------------------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|--------------|
|                              | $R_{a1}$   | $R_{q1}$ | $R_{z1}$ | $R_{\max 1}$ | $R_{a2}$ | $R_{q2}$ | $R_{z2}$ | $R_{\max 2}$ |
| 1                            | 0,2998     | 0,8766   | 0,5747   | 0,0011       | 0,3962   | 0,7245   | 0,2484   | 0,6016       |
| 2                            | 0,2157     | 0,4178   | 0,8307   | 0,8647       | 0,9507   | 0,6199   | 0,9890   | 0,7033       |
| 3                            | 0,6026     | 0,4251   | 0,3410   | 0,0059       | 0,0482   | 0,1261   | 0,0124   | 0,3536       |
| 4                            | 0,2437     | 0,1237   | 0,0252   | 0,4048       | 0,1250   | 0,1409   | 0,0366   | 0,2759       |
| 5                            | 0,0924     | 0,1149   | 0,0994   | 0,3367       | 0,000002 | 0,000001 | 0,0003   | 0,00001      |
| 6                            | 0,7766     | 0,8126   | 0,9436   | 0,4131       | 0,000008 | 0,000005 | 0,00003  | 0,00003      |

Примечание: круги  $i$  – см. раздел 1.1.

Как видно из табл. 2, наилучшие результаты по нормальности распределений получены при шлифовании деталей ВТ22 нитридборовым ВПК В126 с твердостью  $M$  ( $i = 2$ ): из восьми параметров  $H_0$  приняты для шести. Если учесть, что параметры шероховатости в направлении  $d = 1$  превышают аналоги в продольном направлении и доминируют в обеспечении эксплуатационных свойств деталей [9], то приоритеты между кругами следует перераспределить. На первую позицию выдвигается круг 39С ( $i = 6$ ) с крупностью зерен 60, для которого обеспечена нормальность распределений по всем поперечным параметрам. На следующую позицию передвигаются нитридборовые ВПК  $i = 1; 2$ . Как видим, требования к СВ, которые предъявляет параметрический метод, обеспечены в неполном объеме. Это предопределило приоритетным направлением для интерпретации экспериментальных данных принять ранговые статистики.

## 2.2. Оценка режущих свойств кругов по мерам положения

На первом этапе анализа экспериментальных данных уточним их соотношение в двух ортогональных направлениях. По опытным медианам  $(\tilde{y}_1 / \tilde{y}_2)_i$ ,  $i = \overline{1;6}$  установлено, что для конкретных параметров шероховатости имеют место соотношения:  $(\tilde{R}_{a1} / \tilde{R}_{a2})_i = 2,23 - 3,14$ ;  $(\tilde{R}_{q1} / \tilde{R}_{q2})_i = 2,26 - 3,14$ ;  $(\tilde{R}_{z1} / \tilde{R}_{z2})_i = 2,37 - 3,22$ ;  $(\tilde{R}_{\max 1} / \tilde{R}_{\max 2})_i = 2,16 - 2,83$ . Наименьшая анизотропия шероховатостей по инстру-

ментам предсказана при шлифовании нитридборовым ВПК СВN30 В126 100 MV К27-КФ40, а наибольшая – кругом Norton с зернистостью 46 ( $i = 5$ ). По параметрам шероховатости наименьшая изотропность топографии относится к  $R_z$ , а наибольшая – к  $R_{\max}$ . Анизотропность шероховатостей  $d = 1; 2$  следует использовать для повышения эксплуатационных свойств деталей, располагая их при шлифовании таким образом, чтобы при эксплуатации машин продольные шероховатости воспринимали наибольшие нагрузки.

При работе машин наибольшей информативностью обладают высотные параметры  $(R_a, R_{\max})_1$ , расположенные в поперечном направлении. По их опорным значениям проведена оценка режущих способностей кругов  $i = \overline{1;6}$ , табл. 3).

Полученные опытные и ожидаемые опорные значения проанализируем в двух аспектах: с позиций статистики и технологии шлифования. В первом случае выявлено, что для параметров  $(R_a, R_q, R_z, R_{\max})_1$ , которые частично представлены в табл. 3, двадцать опытных медиан  $\tilde{Y}_{1i}$ ,  $i = \overline{1;6}$  из общего числа  $N = 4 \times 6 = 24$  оказались меньше одноименных опытных средних. При этом только для одной шероховатости  $\tilde{R}_{a12}$  параметрическая мера положения превысила медиану на одну КВ. Для остальной номенклатуры шероховатостей сдвиг  $\tilde{Y}_{1i}$  относительно  $Y_{1i}$  протекал внутри КВ. Ситуация, при которой

Влияние характеристик кругов на меры положения шероховатостей и коэффициенты (4)–(7) для параметров  $(R_a, R_{max})_1$

| Параметр    | Круг $i = \overline{1;6}$ | $y_{1i\bullet}$ , МКМ | $\tilde{y}_{1i}$ , МКМ | $\hat{y}_{1i\bullet}$ , МКМ | $m\hat{y}_{1i}$ , МКМ | $K_{M1i}$ (4) | $\bar{K}_{M1i}$ (5) | $K_{1i}$ (6) | $\bar{K}_{1i}$ (7) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------|--------------------|
| $R_{ali}$   | 1                         | 0,484<br>(0,50)       | 0,481<br>(0,50)        | 0,490<br>(0,50)             | 0,480<br>(0,50)       | 0,993         | 0,979               | 1,000        | 1,000              |
|             | 2                         | 0,509<br>(0,63)       | 0,490<br>(0,50)        | 0,494<br>(0,50)             | 0,480<br>(0,50)       | 0,963         | 0,971               | 1,019        | 1,000              |
|             | 3                         | 0,503<br>(0,63)       | 0,501<br>(0,63)        | 0,494<br>(0,50)             | 0,480<br>(0,50)       | 0,997         | 0,971               | 1,042        | 1,000              |
|             | 4                         | 0,464<br>(0,50)       | 0,447<br>(0,50)        | 0,482<br>(0,50)             | 0,480<br>(0,50)       | 0,965         | 0,996               | 0,930        | 1,000              |
|             | 5                         | 0,286<br>(0,32)       | 0,289<br>(0,32)        | 0,293<br>(0,32)             | 0,291<br>(0,32)       | 1,009         | 0,994               | 0,601        | 0,607              |
|             | 6                         | 0,300<br>(0,32)       | 0,294<br>(0,32)        | 0,293<br>(0,32)             | 0,291<br>(0,32)       | 0,979         | 0,994               | 0,610        | 0,607              |
| $R_{max1i}$ | 1                         | 2,874<br>(3,2)        | 2,747<br>(3,2)         | 2,886<br>(3,2)              | 2,817<br>(3,2)        | 0,956         | 0,976               | 1,000        | 1,000              |
|             | 2                         | 2,981<br>(3,2)        | 2,993<br>(3,2)         | 2,930<br>(3,2)              | 2,817<br>(3,2)        | 1,004         | 0,962               | 1,090        | 1,000              |
|             | 3                         | 3,001<br>(3,2)        | 2,878<br>(3,2)         | 2,941<br>(3,2)              | 2,817<br>(3,2)        | 0,959         | 0,958               | 1,048        | 1,000              |
|             | 4                         | 2,688<br>(3,2)        | 2,651<br>(3,2)         | 2,809<br>(3,2)              | 2,817<br>(3,2)        | 0,986         | 1,003               | 0,965        | 1,000              |
|             | 5                         | 1,675<br>(2,0)        | 1,655<br>(2,0)         | 1,740<br>(2,0)              | 1,700<br>(2,0)        | 0,988         | 0,977               | 0,603        | 0,604              |
|             | 6                         | 1,804<br>(2,0)        | 1,746<br>(2,0)         | 1,740<br>(2,0)              | 1,700<br>(2,0)        | 0,968         | 0,977               | 0,636        | 0,604              |

Примечание: круги  $i$  – см. раздел 1.1, в скобках – КВ [25].

медианные коэффициенты (4) оказались меньше единицы, вскрывает дополнительные резервы повышения эксплуатационных показателей машин или производительности шлифования. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности привлечения рангового метода взамен гауссового конкурента, который «на чужом поле» [29] показал меньшую точность поиска опорных величин. Различия между медианными коэффициентами (5) и (4) также подтверждают целесообразность проведения второго этапа ОДА. Сказанное полностью сохраняется при оценке режущих свойств кругов по формулам (6) и (7). Дело в том, что по опытным медианам (6) режущие способности кругов  $i = \overline{1;4}$

различаются между собой, а по ожидаемым аналогам  $m\hat{y}_{1i}$ ,  $i = \overline{2;4}$  коэффициенты равны единице, в том числе и для шероховатостей  $(R_q, R_z)_{1i}$ . Таким образом, для нитридных ВПК  $i = \overline{1;4}$  варьирование зернистости от В76 до В151 и снижение степени твердости от  $O$  до  $M$  на 5 %-м уровне признано незначимым. Сказанное, вероятнее всего, обусловлено модулем упругости титановых заготовок, который по сравнению со сталями почти в два раза ниже. С повышением температуры резания до 350 °С он дополнительно уменьшается почти по линейному закону [5], что усиливает упругое последствие титана, которое ведет к росту сил резания по задним поверхностям зерен и соответствен-

но усиливает упругий натяг в технологическом звене «заготовка–ВПК», выполняя роль виброгасителя [33]. Отмеченные закономерности сопровождаются уменьшением составляющих  $h_2$  и  $h_5$  в выражении (1). Дополнительно снижаются элементарные величины  $h_3$  и  $h_4$  соответственно в результате низкой пластичности сплава BT22 и высокой химической инертности зерен CBN по отношению к титану. При этом относительно  $h_3$  полагаем, что при шлифовании температуры резания 500...600 °С и выше не могут вызвать значимого снижения прочности и текучести титановых сплавов при повышении их пластичности, как отмечено в [5] при сплошном нагреве образцов. Это обусловлено тем, что указанные температуры шлифования на поверхности детали характеризуются высоким градиентом снижения.

Особенности шлифования деталей BT22 становятся более убедительными, если воспользоваться результатами, полученными в аналогичных условиях для быстрорежущих пластин (БП) P9M4K8 и заготовок из стали 06X14N6Д2МВТ-Ш (ЭП817-Ш). Установлено, что при шлифовании БП наиболее гладкая поверхность предсказана при зернистости B126, которая оказалась меньше на две КВ, чем при B76 и B151. При этом возрастание твердости ВПК  $i = 2; 3$  в указанном интервале сопровождалось снижением опорных значений также на две КВ. Одновременно при шлифовании заготовок ЭП817-Ш усилилась роль выбора твердости ВПК: меры положения для различных параметров шероховатости снизились на 2...3 КВ. При этом минимум шероховатости достигнут при зернистости B151. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение модуля упругости стальных заготовок почти в два раза по сравнению с титаном усилило влияние размеров зерен CBN и твердости нитридных ВПК на формирование опорных значений шероховатости. Выявлено, что рекомендации по их выбору для материалов BT22, P9M4K8, ЭП817-Ш оказались различными. В разделе 1.1 было указано, что доминирующий вклад в шероховатость (1) вносит составляющая  $h_1$ , а остальные следует отнести к второстепенным величинам [3]. Однако приведенные результаты выявили значительные различия шероховатостей при неизменной составляющей  $h_1$ .

Режущие способности кругов Norton по зернистостям 46 и 60 предсказаны по ожидаемым медианам равнозначными. Инструменты Norton позволили снизить шероховатости относительно нитридных ВПК в 1,6...1,66 раза или на три КВ. Полученные результаты делают целесообразным вести предварительное шлифование ВПК CBN с целью минимизации теплового воздействия на деталь [14,16], а чистовое – кругами Norton для более эффективного снижения микронеровностей.

### 2.3. Выбор кругов по мерам рассеяния шероховатостей

При обработке операционной партии заготовок на настроенных станках высокую роль играет стабильность (воспроизводимость) процесса шлифования, которая регулируется мерой рассеяния. В табл. 4 представлены все три параметра прецизионности:  $(SD, R, KШ)_{i1}$ . В условиях приоритетного использования непараметрического метода предпочтение отдано результатам, предсказанным по  $KШ_{i1}$  и коэффициентам (10).

Выявлено, что варьирование зернистости ВПК от B76 до B151 при неизменной степени твердости  $O$  аппроксимируется экстремальной кривой с максимумом  $KШ_{13}$  при зернистости B126. При этом минимум зависимости кривой  $KШ = \psi$  (зернистость) для параметров  $R_{a14}$ ,  $R_{max14}$  (см. табл. 4),  $R_{q14}$ , достигнут при шлифовании крупнозернистым ВПК B151 ( $i = 4$ ), а для высоты неровностей профиля – при зернистости B76 ( $i = 1$ ). Для сопоставления при обработке заготовок ЭП817-Ш минимум  $KШ$  отмечен при наименьшей зернистости B76, а  $KШ_{max}$  – при B126 для всех параметров шероховатости. Последнее полностью совпало с результатами шлифования деталей BT22. В ВПК  $i = 2; 3$  варьировалась только степень твердости соответственно от средней ( $i = 2$ ) до среднетвердой ( $i = 3$ ). Единая корреляционная связь по  $KШ$  между ними не выявлена:  $KШ_{12} = KШ_{13}$  – для параметра  $R_{a1}$ ;  $KШ_{12} < KШ_{13}$  – для наибольшей высоты профиля. Другая ситуация сложилась для деталей ЭП817-Ш: повышение твердости ВПК в изучаемом диапазоне вызвало снижение меры рассеяния по параметрам  $R_{a1}$  и  $R_{max1}$  соответственно в 2,5 и 2,3 раза. Параметрические оценки прецизионности для деталей BT22 предсказаны более стабильными и расположили ВПК в сле-

Выборочные оценки режущих свойств кругов по мерам рассеяния

| Параметр    | Круг<br>$i = \overline{1; 6}$ | $SD_{1i}$ | $R_{1i}$ | $КШ_{1i}$ | $K_{ст1ij}$ |             |              |
|-------------|-------------------------------|-----------|----------|-----------|-------------|-------------|--------------|
|             |                               | мкм       |          |           | $j = 1 (8)$ | $j = 2 (9)$ | $j = 3 (10)$ |
| $R_{ali}$   | 1                             | 0,053     | 0,257    | 0,060     | 1,000       | 1,000       | 1,000        |
|             | 2                             | 0,069     | 0,311    | 0,090     | 0,769       | 0,826       | 0,667        |
|             | 3                             | 0,080     | 0,370    | 0,090     | 0,661       | 0,694       | 0,667        |
|             | 4                             | 0,062     | 0,286    | 0,064     | 0,857       | 0,898       | 0,938        |
|             | 5                             | 0,052     | 0,264    | 0,055     | 1,025       | 0,973       | 1,091        |
|             | 6                             | 0,050     | 0,195    | 0,087     | 1,062       | 1,319       | 0,690        |
| $R_{max1i}$ | 1                             | 0,294     | 1,154    | 0,430     | 1,000       | 1,000       | 1,000        |
|             | 2                             | 0,406     | 1,894    | 0,572     | 0,724       | 0,609       | 0,752        |
|             | 3                             | 0,634     | 2,671    | 0,594     | 0,463       | 0,432       | 0,724        |
|             | 4                             | 0,334     | 1,277    | 0,413     | 0,880       | 0,904       | 1,041        |
|             | 5                             | 0,273     | 1,230    | 0,387     | 1,077       | 0,938       | 1,111        |
|             | 6                             | 0,280     | 1,098    | 0,462     | 1,051       | 1,051       | 0,931        |

Примечание: круги  $i$  – см. раздел 1.1.

дующей возрастающей последовательности мер рассеяния: 1-В76, 2-В151, 3-В126М, 4-В126О. Как видно из табл. 4, минимальная и наибольшая прецизионности по зернистостям для обоих методов статистики совпали. По  $(SD, R)_{1i}$ ,  $i = 2; 3$  получены однозначные результаты, свидетельствующие о снижении воспроизводимости процесса шлифования с увеличением твердости ВПК от  $M$  до  $O$ : в 1,16...1,56 раза по  $SD$  и 1,13...1,41 раза по размахам. В обоих случаях наибольшее снижение стабильности процесса шлифования предсказано для параметра  $R_{max1}$ . Как было выявлено в разделе 2.1, при шлифовании деталей ВПК наблюдения (2) характеризуются высокой степенью гомогенности дисперсий, а ранговый метод их интерпретации выбран в результате нарушений нормальности распределений (табл.1). Вероятно, по этой причине получены довольно стабильные оценки по параметрическим мерам рассеяния. Отметим, что повышение стабильности процесса шлифования посредством варьирования твердости ВПК должно проводиться с учетом материала шлифуемых деталей. В частности, для ВТ22 ее целесообразно снижать, а для ЭП817-Ш, напротив, повышать.

По кругам *Norton* наибольшая стабильность по  $КШ_{1i}$ ,  $i = 5; 6$  показана при использовании более крупных зерен 46. Эта характеристика оказалась даже выше, чем для базового ВПК  $i = 1$ , о чем свидетельствуют коэффициенты (10): 1,09...1,11. Параметрические оценки мер рассеяния по кругам *Norton*, особенно по размахам, для большинства случаев шлифования показали возрастание воспроизводимости обработки при использовании кругов *Norton* с более мелкими зернами (при зернистости 60).

## Выводы

1. В условиях нарушений однородности дисперсий и нормальности распределений привлечение непараметрического метода взамен широко применяемого в технических приложениях гауссового конкурента оказалось целесообразным, в частности, при поиске мер положения. Установлено, что имеет место снижение медиан относительно средних, хотя данное явление протекало в пределах КВ. Об этом свидетельствуют медианные коэффициенты (4) и (5), которые оказались в большинстве случаев меньше единицы.



Это позволяет повысить производительность шлифования при сохранении качества поверхности деталей неизменным.

2. Выявлено, что при шлифовании деталей из титанового сплава ВТ22 круги *Norton* обеспечивают наибольшее снижение высот микронеровностей по сравнению с нитридборовыми ВПК: по ожидаемым медианам различие предсказано в 1,6...1,7 раза. По этой причине ВПК СВН30 следует использовать на предварительном этапе шлифования, чтобы снизить тепловое воздействие круга на деталь, а круги *Norton* – на окончательном шлифовании при высоких требованиях к шероховатостям деталей. Титановые сплавы оказались мало чувствительными по мерам положения к варьированию зернистости и твердости кругов независимо от материала зерен. По всей вероятности сказанное обусловлено низким модулем упругости титана.

3. Меры рассеяния следует признать более переменными по сравнению с медианами и средними к переменным условиям шлифования. При использовании нитридборовых ВПК наименьшие  $KШ_{1i}$  предсказаны при  $i = 1; 4$  (т. е. при зернистостях В76 и В151). Для зернистости В126 стабильность процесса по  $KШ_{13}$  снизилась в 1,4...1,5 раза. Варьирование твердости ВПК от среднетвердой ( $i = 3$ ) до средней ( $i = 2$ ) следует признать незначимым по  $KШ$ . Одновременно по  $(SD, R)_{1i}$ ,  $i = 2; 3$  отмечено возрастание прецизионности процесса. Последнее свидетельствует, что при высоком уровне однородности дисперсий параметрические оценки оказались более точными, чем по квартильным широтам.

### Список литературы

1. Фрезы и фрезерование / О.М. Балла и др. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 172 с. – ISBN 5803803774.
2. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин и др. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
3. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 616 с. – (Тонкие наукоемкие технологии). – ISBN 978-5-94178-373-1.
4. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / ed. by C. Leyens, M. Peters. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003. – 532 p. – ISBN 978-3-527-30534-6.

5. Кремень З.И., Юрьев В.Г. Шлифование суперabrasивами высокопластичных сплавов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 167 с. – ISBN 978-5-7422-1034-1.

6. Исследование химического состава поверхностного слоя титанового сплава при шлифовании его кругом из карбида кремния без использования СОТС / С.В. Носенко, В.А. Носенко, А.А. Крутинова, Л.Л. Кременецкий // СТИН. – 2015. – № 1. – С. 26–29.

7. Применение высокопористых кругов из синтеркорунда при профильном шлифовании фасонного режущего инструмента / Е.Г. Полканов, О.С. Кискин, С. Големы, С.Л. Рябцев // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 11. – С. 30–32.

8. *Wójcik R.* The grinding of titanium alloys // Archives of Mechanical Technology and Automation. – 2013. – Vol. 33, N. 4. – P. 49–60.

9. Саютин Г.И., Богуцкий А.Д., Мельников Г.А. Применение кругов из эльбора для шлифования титановых и жаропрочных сплавов // Станки и инструмент. – 1975. – № 2. – С. 30–31.

10. Саютин Г.И. Выбор шлифовальных кругов (для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей). – М.: Машиностроение, 1976. – 64 с.

11. Саютин Г.И., Татаринцев И.П. Выбор материала круга при шлифовании титановых сплавов // Станки и инструмент. – 1985. – № 7. – С. 21–22.

12. *Yang Ch.Y., Xu J.H., Ding W.F., Tong S.T.* Grinding titanium alloy with brazed monolayer CBN wheels // Key Engineering Materials. – 2007. – Vol. 359/360. – P. 33–37. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.359-360.33.

13. *Xu X., Yu Y., Huang H.* Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. – 2003. – Vol. 255, iss. 7–12. – P. 1421–1426. – doi: 10.1016/S0043-1648(03)00163-7.

14. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под ред. З.И. Кременя. – СПб: Политехника, 2007. – 425 с. – ISBN 978-5-7325-0517-7

15. 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.

16. Кремень З.И., Поповский Д.А., Юрьев В.Г. Шлифование титановых сплавов шлифовальными кругами на основе эльбора и алмаза // Вестник машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 66–69.

17. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб: Лань, 2013. – 320 с. – ISBN 978-5-8114-1481-9.

18. *Turley D.M.* Factors affecting surface finish when grinding titanium and a titanium alloy (Ti-6Al-4V) // *Wear*. – 1985. – Vol. 104, iss. 4. – P. 323–335. – doi:10.1016/0043-1648(85)90040-7.

19. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive / G. Guoqiang, L. Zhiqiang, A. Qinglong, Ch. Ming // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 57, iss. 1. – P. 135–142. – doi: 10.1007/s00170-011-3272-z.

20. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслев, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов, С.Г. Бишутин, И.В. Говоров, А.О. Горленко, Д.И. Петрешин, В.И. Сакало, С.Ю. Съянов, В.П. Тихомиров, О.Н. Федонин, В.П. Федоров, Д.Н. Финатов, А.Н. Щербаков; под ред. А.Г. Суслева. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с. – ISBN 978-5-217-03427-7.

21. *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 / Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2006. – 537 с.

22. *Королев А.В., Решетникова О.П., Носков А.С.* Геометрические параметры режущей части абразивных зерен // *СТИН*. – 2015. – № 5. – С. 2–7.

23. ГОСТ 53923–2010. Круги алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора) шлифовальные. Технические условия. ISO 22917:2004. Superabrasives – Limit deviations and run-out tolerances for grinding wheels with diamond or cubic boron nitride (MOD) – Введ. 2012–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 32 с.

24. Шлифкруги. NORTON [Electronic resource]. – URL: <http://www.tehnotools.com/upload/iblock/9be/9be7e214f25e68c5398c87614355aa31.pdf> (дата обращения: 02.11.2015).

25. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – Взамен ГОСТ 2789–1959; введ. 1975–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 10 с.

26. ГОСТ 53922–2010. Порошки алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора). Зернистость и зерновой состав шлифпорошков. Контроль зернового состава. ISO 6106:2005. Abrasive products – Checking the grit size of superabrasives (MOD). – Введ. 2012–01–01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 11 с.

27. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Введ. 1983–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 20 с.

28. *Уилер Д., Чамберс Д.* Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с. – ISBN 978-5-9614-0832-4.

29. *Hollander M., Wolfe D.A.* Nonparametric statistical methods. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1999. – 816 p. – ISBN-10 0471190454. – ISBN-13 978-0471190455.

30. ГОСТ Р ИСО 5725–1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения. – Введ. 2002–11–01. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 24 с.

31. Экспериментальный и статистический методы исследования шлифуемости высокопрочных титановых сплавов эльборовыми кругами высокой пористости по критерию шероховатости / Я.И. Соллер, И.А. Гуцол, В.Л. Нгуен и др. // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – С. 46–53.

32. *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, iss. 3. – P. 251–261. – doi: 10.3103/S1068798X10030111.

33. *Соллер Я.И., Михайлюк Э.А.* Динамика и точность фрезерования высокопрочных материалов // *Механика деформируемых сред в технологических процессах: межвузовский сборник научных трудов*. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – С. 106–111.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 18–30

**Select of abrasive wheels while pendular grinding of parts from titanium alloy VT22 by high roughness parameters****Soler Ya. I.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru**Mai D. S.**, Ph.D. student, e-mail: mdsmm07@gmail.com

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

**Abstract**

At the present time, grinding of the titanium alloys parts is performed much less than other constructional materials that don't meet the demands of branches of engineering industries: aircraft, rocket, energy and others. This is due to the sticking of chips on the working surface of the abrasive tools from silicon carbide and electrocorundum because of the high adhesion activity between the titanium and the traditional abrasives at cutting working temperatures. To solve this problem, the high porous wheels (HPW) made of cubic boron nitride CBN30 with 100% concentration on a bond V (K27), a pore-forming KF40, varied grains: B76, B126, B151 (GOST R 53922 – 2010) – and hardness: M and O (GOST R 52587 – 2006) were used to grind titanium workpieces. Additionally the Norton wheels from green silicon carbide with a normal porosity 39C (46; 60) K8 VK and with different grain size were tested. With account for the instability of the grinding process and the random nature of roughness formation, the observation analysis was led using the statistical approaches. It allowed considering the random variables (RV), the characteristics of the one-dimensional frequency distribution which are measures of position (mean, median) and measures of scattering (standard deviation, range and quartile latitudes (QL)). In the technical applications parametric and nonparametric statistical methods were used. The first direction requires that the RV have homoscedasticity and normal distribution that is not fully secured in this study. For this reason, the nonparametric method was selected priority. Its characteristics are medians and QL. It is established that varying the process variables for each group of instruments is insignificant by measures of position. Norton wheels provide reduction of roughness height 1.6 – 1.7 times in comparison with boron nitride HPW. These are recommended for the finishing grinding stage and HPW CBN30 – the preliminary to reduce the thermal effects on workpieces. By processing stability, the Norton wheels with grain 46 rank the first, and among boron nitride HPW - CBN30 B76 100 OV K27–KF40.

**Keywords:**

grinding, titanium alloy, roughness, statistic, mean, median, measure of position.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-18-30

**References**

1. Balla O.M., Zamashchikov Yu.I., Livshits O.P. et al. *Frezy i frezerovanie* [Mills and milling]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2006. 172 p. ISBN 5803803774
2. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razuvaeva I.N., Gol'dfain V.N. *Titanovye splavy v mashinostroenii* [Titanium alloys in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 248 p.
3. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Metal grinding technology]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 616 p. ISBN 978-5-94178-373-1
4. Leyens C., Peters M., eds. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2003. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6
5. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G. *Shlifovanie superabrazivami vysokoplastichnykh splavov* [Super abrasive grinding of superplastic alloys]. Saint Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2013. 167 p. ISBN 978-5-7422-1034-1
6. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Krutinova A.A., Kremenetskii L.L. *Issledovanie khimicheskogo sostava poverkhnostnogo sloya titanovogo splava pri shlifovanii ego krugom iz karbida kremniya bez ispol'zovaniya SOTS* [The study of the chemical composition of the surface layer of the titanium alloy at grinding by silicon carbide wheel without lubricant-cooling agent]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2015, no. 1, pp. 26–29. (In Russian)





7. Polkanov E.G., Kiskin O.S., Golemi S., Ryabtsev S.L. Primenenie vysokoporistykh krugov iz sinterkorunda pri profil'nom shlifovanii fasonnogo rezhushchego instrumenta [Application of highly porous wheels from sintered corundum for profile grinding the shaped cutting tool]. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal – HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2008, no. 11, pp. 30–32.

8. Wójcik R. The grinding of titanium alloys. *Archives of Mechanical Technology and Automation*, 2013, vol. 33, no. 4, pp. 49–60.

9. Sayutin G.I., Bogutskii A.D., Mel'nikov G.A. Primenenie krugov iz el'bora dlya shlifovaniya titanovykh i zharoprochnykh splavov [The use CBN wheels for grinding titanium and superalloys]. *Stanki i instrument – Machines and tooling*, 1975, no. 2, pp. 30–31. (In Russian)

10. Sayutin G.I. *Vybor shlifoval'nykh krugov (dlya obrabotki zharoprochnykh splavov i instrumental'nykh staley)* [Selection of grinding wheel (for the treatment of heat-resistant alloys and tool steels)], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 64 p.

11. Sayutin G.I., Tatarinov I.P. Vybor materiala kruga pri shlifovanii titanovykh splavov [The choice of material for grinding wheel titanium alloys]. *Stanki i instrument – Soviet Engineering Research*, 1985, no. 7, pp. 21–22. (In Russian)

12. Yang Ch.Y., Xu J.H., Ding W.F., Tong S.T. Grinding titanium alloy with brazed monolayer CBN wheels. *Key Engineering Materials*, 2007, vol. 359–360, pp. 33–37. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.359-360.33

13. Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys. *Wear*, 2003, Vol. 255, iss. 7–12, pp. 1421–1426. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00163-7

14. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2007. 424 p. ISBN 978-5-7325-0517-7

15. Kremen' Z.I. Vysokoporistye krugi – effektivnoe sredstvo povysheniya proizvoditel'nosti shlifovaniya i kachestva detalei iz razlichnykh materialov [The highly porous wheels – an effective means of increasing productivity and quality of grinding parts made of various materials]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technology*, 2001, no. 5–6, pp. 34–37.

16. Kremen' Z.I., Popovskii D.A., Yur'ev V.G. Shlifovanie titanovykh splavov shlifoval'nymi krugami na osnove el'bora i almaza [Glazing titanium alloys by diamond-dressed and borazon-dressed wheels]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 2013, no. 5, pp. 66–69. (In Russian)

17. Makarov V.F. *Sovremennye metody vysokoeffektivnoi abrazivnoi obrabotki zharoprochnykh staley i splavov* [Modern methods of highly abrasion machining of heat-resistant steels and alloys]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2013. 320 p. ISBN 978-5-8114-1481-9

18. Turley D.M. Factors affecting surface finish when grinding titanium and a titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Wear*, 1985, vol. 104, iss. 4, pp. 323–335. doi:10.1016/0043-1648(85)90040-7

19. Guoqiang G., Zhiqiang L., Qinglong A., Ming Ch. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 57, iss. 1, pp. 135–142. doi: 10.1007/s00170-011-3272-z

20. Suslov A.G., Bez'yazychnyi V.F., Panfilov Yu.V., Bishutin S.G., Govorov I.V., Gorlenko A.O., Petreshin D.I., Sakalo V.I., S'yanov S.Yu., Tikhomirov V.P., Fedonin O.N., Fedorov V.P., Finatov D.N., Shcherbakov A.N. *Inzheneriya poverkhnosti detalei* [Surface engineering details]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 318 p. ISBN 978-5-217-03427-7

21. Unyanin A.N. *Nauchnoe i tekhnologicheskoe obespechenie shlifovaniya zagotovok iz plastichnykh staley i splavov s predotvrashcheniem zasalivaniya 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, 2006. 537 p.

22. Korolev A.V., Reshetnikova O.P., Noskov A.S. Geometricheskie parametry rezhushchei chasti abrazivnykh zeren [The geometrical parameters of abrasive grains cutting part]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2015, no. 5, pp. 2–7.

23. GOST 53923–2010. *Krugi almaznye i iz kubicheskogo nitrida bora (el'bora) shlifoval'nye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 53923–2010. Diamond and cubic boron nitride (elbor) grinding wheels. Specifications]. ISO 22917:2004. Superabrasives – Limit deviations and run-out tolerances for grinding wheels with diamond or cubic boron nitride (MOD). Moscow, Standartinform Publ., 2011. 32 p.

24. Grinding wheels. NORTON. Available at: <http://www.tehnotools.com/upload/iblock/9be/9be7e214f25e68c5398c87614355aa31.pdf> (accessed 02.11.2015) (In Russian)

25. GOST 2789–73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniya* [State Standard 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 1973. 10 p.



26. GOST 53922-2010. *Poroshki almaznye i iz kubicheskogo nitrída bora (el'bora). Zernístost' i zernovoi sostav shlifporoshkov. Kontrol' zernovogo sostava* [State Standard 53922-2010. Diamond and from cubic boron nitride (elbon) powders. Grain and grain size distribution of grinding powders. Test of grain size distribution]. ISO 6106:2005. Abrasive products – Checking the grit size of superabrasives (MOD). Moscow, Standartinform Publ., 2011. 11 p.
27. GOST 25142–82. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya* [State Standard 25142–82. Surface roughness. Term and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1982. 20 p.
28. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Understanding statistical process control*. Introduction by W. Edwards Deming. Knoxville, Tennessee, SPC Press, 1992 (Russ. ed.: Uiler D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsessami: optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta*. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p. ISBN 978-5-9614-0832-4).
29. Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. 2<sup>nd</sup> ed. Wiley-Interscience Publ., 1999. 816 p. ISBN-10 0471190454. ISBN-13 978-0471190455
30. GOST R ISO 5725–1–2002. *Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmerenii. Ch. 1. Osnovnye položeniya i opredeleniya* [Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Pt. 1. General principles and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 31 p.
31. Soler Ya.I., Gutsol I.A., Nguen V.L. et al. [The experimental and statistical methods for studying high-strength titanium alloys grindability CBN wheels high porosity on the criterion of roughness]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno–tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem “Zhiznennyi tsikl konstruktsionnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii)”* [Proceedings of the 3rd All-Russian scientific conference with international participation “The life cycle of construction materials (from receipt to disposal)”]. Irkutsk, 2013, pp. 46–53. (In Russian)
32. 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, iss. 3, pp. 251–261. doi: 10.3103/S1068798X10030111
33. Soler Ya.I., Mikhailyuk E.A. [Dynamics and precision of milling high-strength materials]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov “Mekhanika deformiruemykh sred v tekhnologicheskikh protsessakh”* [Interuniversity collection of scientific papers “Mechanics of deformable media in technological processes”]. Irkutsk, 2000, pp. 106–111. (In Russian)

**Article history:**

Received 19 June 2015

Revised 17 July 2015

Accepted 20 October 2015