

УДК 621.923
DOI 10.17513/snt.39728

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И СИЛА РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА КРУГАМИ РАЗЛИЧНОЙ ТВЕРДОСТИ

Кременецкий Л.Л., Сердюков Н.Д.

*Волжский политехнический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
Волжский, e-mail: kreleonid@yandex.ru*

Статья посвящена исследованию шероховатости обработанной поверхности и силы резания при обработке титанового сплава ВТ9 кругами из карбида кремния зеленого твердостью G и H методом глубинного шлифования (ГШ). Анализ шероховатости, оцениваемой по параметру Ra, проведен по длине шлифованной поверхности с учетом этапа ГШ. Установлено, что Ra изменяется на различных сечениях образца. Переход между этапами при ГШ кругом меньшей твердости 64CF100G12V не влияет на среднее значение Ra при режущей способности $Q \leq 350$ мм²/мин. При обработке кругом большей твердости 64CF100H12V среднее значение Ra зависит от этапа шлифования при $Q = 250\text{--}350$ мм²/мин. Твердость шлифовального круга из карбида кремния оказывает влияние на среднее значение Ra только при $Q = 300\text{--}350$ мм²/мин. Средние значения составляющих силы резания Pz, Py увеличиваются с ростом производительности обработки. Переход от круга G к кругу H при различных режимах ГШ приводит к росту среднего значения Pz на 8–15%, Py на 20–35%. Для ГШ титанового сплава ВТ9 в заданных условиях рекомендуется использовать круг меньшей твердости 64CF100G12V.

Ключевые слова: шлифовальный круг из карбида кремния, твердость шлифовального круга, режущая способность, составляющие силы резания, ВТ9, шероховатость поверхности

Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 13/45-22.

SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING FORCE AT GRINDING TITANIUM ALLOY BY WHEELS WITH DIFFERENT HARDNESS GRADE

Kremenetskiy L.L., Serdyukov N.D.

*Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgograd State Technical University, Volzhsky,
e-mail: kreleonid@yandex.ru*

The article considers the research of surface roughness and cutting force during machining of VT9 titanium alloy by green silicon carbide wheels of G and H hardness grades at creep-feed grinding (CFG). The entire surface of workpiece was analyzed by the Ra parameter, taking into account the stage of CFG. It is established that Ra varies on different sections of the sample. The transition between CFG stages at machining by softer 64CF100G12V wheel doesn't affect the average value of Ra at cutting capacity $Q \leq 350$ mm²/min. The stage of grinding affects the average Ra at $Q = 250\text{--}350$ mm²/min at grinding by harder 64CF100H12V wheel. The silicon carbide wheel's hardness affects the average value of Ra only at $Q = 300\text{--}350$ mm²/min. The average values of cutting force components Pz, Py increase with increasing machining capacity. The transition from G wheel to H wheel in CFG different modes leads to an increase in the average value of Pz by 8–15%, Py by 20–35%. It is recommended to use 64CF100G12V lower hardness wheel for creep-feed grinding VT9 titanium alloy under given conditions.

Keywords: silicon carbide grinding wheel, hardness grade of grinding wheel, cutting capacity, components of cutting force, VT9, surface roughness

The study was carried out with the financial support of VolgGTU within the framework of the scientific project No. 13/45-22.

Глубинное шлифование (ГШ) широко применяется для обработки высокопрочных сталей, сплавов на основе никеля, алюминия или титана [1, 2]. Метод ГШ позволяет снимать припуск до 25 мм за один продольный ход, что многократно больше, чем позволяет метод традиционного маятникового шлифования за ход стола станка [1]. Данный процесс механической обработки находится в сфере интересов мирового ученого

сообщества: изучается специфика формообразования структуры поверхности [3, 4], возникновения в материале остаточных напряжений при получении деталей способом ГШ [5]; осуществляется разработка смазочно-охлаждающей жидкости [6] и абразивного инструмента [7] для ГШ.

Решение фундаментальной научной проблемы управления процессом ГШ по-прежнему находится в сфере интересов

производства. Учитывая неустойчивость процесса обработки сплавов на основе титана, исследования влияния условий ГШ на такой показатель процесса, как сила резания, имеют большое значение [8, 9]. Вопрос зависимости качества поверхности от производительности ГШ [10, 11] также требует дальнейшего рассмотрения.

Цель работы – исследовать влияние условий ГШ на силу резания и шероховатость обработанной поверхности заготовок деталей из сплава на основе титана.

Материалы и методы исследования

Обработку методом ГШ осуществляли на станке Chevalier «Smart-B1224III» при постоянной правке инструмента алмазным роликом.

В качестве обрабатываемого материала выбран сплав BT9 ГОСТ 19807-91, длина обрабатываемой заготовки $l = 47$ мм.

В качестве инструмента выбраны шлифовальные круги из карбида кремния зеленого 64CF100G12V и 64CF100H12V (далее круги *G*, *H*). Режимы обработки приведены в таблице.

Режимы обработки

Номер режима	Скорость шлифования v , м/с	Объемная режущая способность Q , мм ² /мин
1	20	150
2	20	200
3	20	250
4	20	300
5	20	350

Использовали специальную смазочно-охлаждающую жидкость для титановых сплавов на основе Na_3PO_4 [12]. Расход смазочно-охлаждающей жидкости на гидроочистку и в зону контакта правящего ролика и шлифовального круга составляет 14 л/мин.

Методика измерения шероховатости шлифованной поверхности профилографом Mitutoyo Surftest SJ-410 представлена в работе [13].

Силу резания регистрировали с помощью силоизмерительного комплекса «Ami MC36-1000UP» и ПО «Powergraph».

Результаты исследования и их обсуждение

Номинальная мгновенная режущая способность q характеризует производительность обработки за единицу времени [9]. Процесс ГШ в рассматриваемых условиях состоит из этапа врезания, этапа постоян-

ной длины дуги контакта (ПДДК) и этапа выхода. С переходом от этапа врезания к этапу ПДДК начинается формирование обработанной поверхности, поэтому на графике изменения q по длине шлифования l' этап врезания показан в отрицательной области оси абсцисс (рис. 1). Цифрами обозначены режимы обработки.

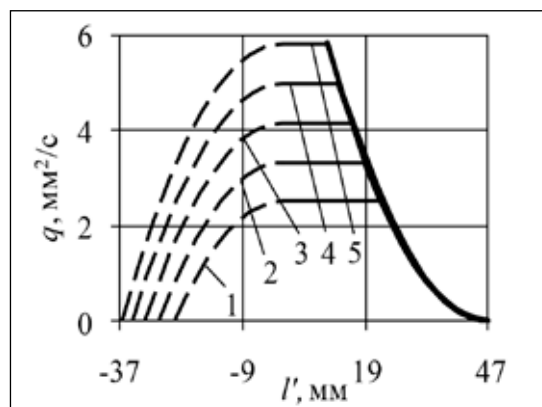


Рис. 1. Изменение q по длине шлифования: --- этап врезания; — этап ПДДК; — этап выхода

С помощью растровой электронной микроскопии установлено, что изменение q на этапах ГШ оказывает влияние на процесс формообразования и микрорельеф обработанной поверхности титанового сплава [13], что подтверждает целесообразность контроля шероховатости по параметру Ra с учетом этапа ГШ по длине заготовки.

Получены диаграммы изменения Ra по длине шлифованной поверхности при ГШ кругами *G* и *H* на различных режимах (рис. 2, а–д).

При шлифовании кругом *G* и режиме 1 Ra снижается с начала этапа ПДДК, затем возрастает с переходом между этапами (рис. 2, а). На расстоянии $l \approx 36$ мм от края заготовки шероховатость поверхности соответствует началу этапа ПДДК. При режиме 2 Ra возрастает на расстоянии $l \approx 16$ мм от края заготовки, далее процесс формообразования поверхности стабилен в течение почти всего периода шлифования (рис. 2, б). В конце этапа выхода Ra изменяется значительно – значение параметра возрастает в 1,3 раза по отношению к началу этапа ПДДК. При шлифовании кругом *G* на режимах 3–5 значение Ra растет за период шлифования; участок поверхности, сформированный при переходе между этапами, свидетельствует о существенных изменениях процесса формообразования (рис. 2, в–д).

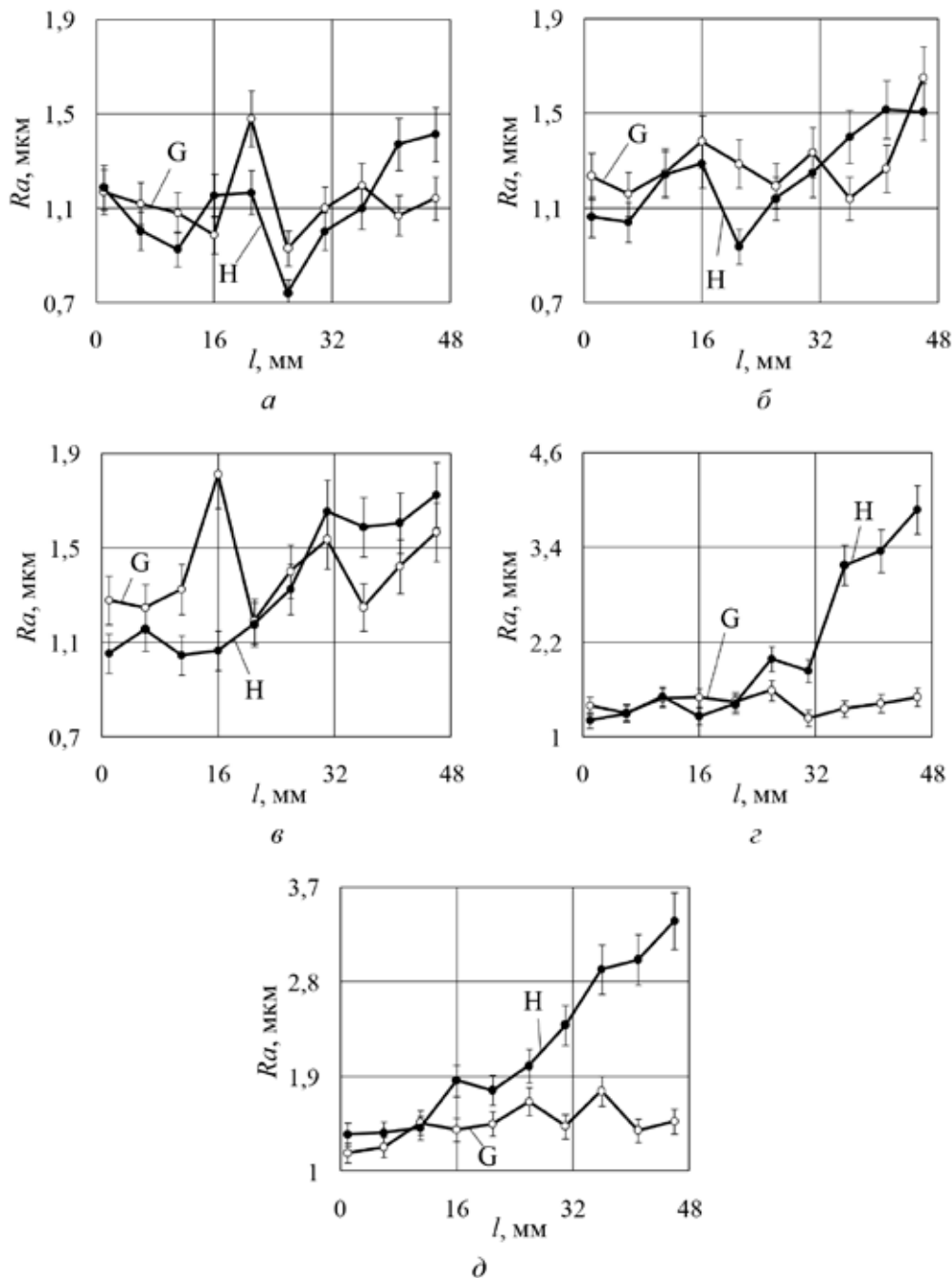


Рис. 2. Изменение Ra по длине шлифованной поверхности l :
 а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

При шлифовании кругом H на каждом из режимов качество, оцениваемое по параметру Ra , снижается по длине обработанной поверхности (рис. 2, а–д). За весь период шлифования Ra возрастает в 1,2 (режим 1); 1,4 (режим 2); 1,6 (режим 3); 3,2 (режим 4) и 2,5 раза (режим 5). С увеличением режущей способности растет разница между состояниями поверхности в начале этапа

ПДДК и в конце этапа выхода. Тем не менее при наиболее мягком режиме шлифования 1 Ra на этапе ПДДК даже снижается; также важно отметить спад Ra при переходе между этапами при режимах 1, 2 и 4. Состояние поверхностей, полученных при режимах 3 и 5 кругом H , характеризуется почти постоянным ростом Ra по длине образца (рис. 2, в, д).

При шлифовании на режимах 1–3 твердость круга оказывает значимое влияние на процесс формирования шероховатости поверхности титанового сплава с середины этапа выхода (рис. 2, а–в). При режимах 4 и 5 с переходом от круга *G* к кругу *H* значения *Ra* по длине шлифованной поверхности заготовки начинают изменяться значимо с переходом между этапами (рис. 2, г, д). Стоит отметить, что на расстоянии $l \leq 5$ мм от края заготовки на этапе ПДДК фактор твердости инструмента так же влияет на процесс формообразования при $Q = 200\text{--}350$ мм²/мин (рис. 2, б–д).

Получены средние значения *Ra* на всей длине шлифованной поверхности и на этапах формообразования при ГШ кругами *G* и *H* на различных режимах (рис. 3).

Среднее значение *Ra* при шлифовании кругом *G* в заданных условиях не зависит от этапа ГШ (рис. 3, а). Среднее значение *Ra*, оцениваемое по всей длине шлифованной поверхности, не зависит от Q в диапазоне 150–250 мм²/мин. При увеличении $Q = 150$ мм²/мин до значений, соответствующих режимам 4 или 5, *Ra* возрастает на 26%.

Среднее значение *Ra* при шлифовании кругом *H* в заданных условиях зависит от этапа ГШ при обработке на режимах 3–5 (рис. 3, б). Так, при режиме 3 разница между средними значениями *Ra* на этапе выхода и этапе ПДДК соответственно составляет 40%, когда при режимах 4, 5 разница между этапами достигает 80%. Таким образом, при обработке с режущей способностью $Q = 250$ мм²/мин и выше среднее значение *Ra* возрастает с переходом от этапа ПДДК к этапу выхода. Среднее значение *Ra*, оцениваемое по всей длине шлифованной поверхности, не зависит от Q в диапазоне 150–250 мм²/мин. При увели-

чении $Q = 150$ мм²/мин до значений, соответствующих режимам 4 и 5, *Ra* возрастает в среднем в 1,9 раза.

Установлено, что при наиболее грубых режимах ГШ 4, 5 ($Q = 300\text{--}350$ мм²/мин) с увеличением твердости круга среднее значение *Ra* по длине шлифованной поверхности возрастает (рис. 3). При меньшей производительности ГШ в рассмотренных условиях шероховатость не зависит от твердости абразивного инструмента.

При ГШ с непрерывной правкой круга составляющие силы резания определяются мгновенной режущей способностью [14]. На этапе врезания с ростом q и дуги окружности круга *L*, соприкасающейся с заготовкой, составляющие силы резания растут. С переходом на этап выхода составляющие силы резания снижаются по мере приближения q и *L* к нулевому значению. За этап ПДДК q не изменяется в случае обеспечения непрерывной правкой стабильного рельефа рабочей поверхности шлифовального круга, потому для оценки средних значений силы резания целесообразно работать с данными, полученными на этом этапе.

Так как при ГШ *L* достигает значительных размеров, а результирующая сила шлифования приложена достаточно далеко от вертикальной оси круга, составляющие силы резания *Pz*, *Py* при данном методе шлифования не определяются согласно ГОСТ 25762-83 как касательная и, соответственно, радиальная составляющие силы [15]. При ГШ составляющие силы резания принято называть горизонтальной составляющей силы резания *Pz* и вертикальной составляющей силы резания *Py* [15]. Получены средние значения горизонтальной *Pz* и вертикальной *Py* составляющих силы резания на этапе ПДДК (рис. 4).

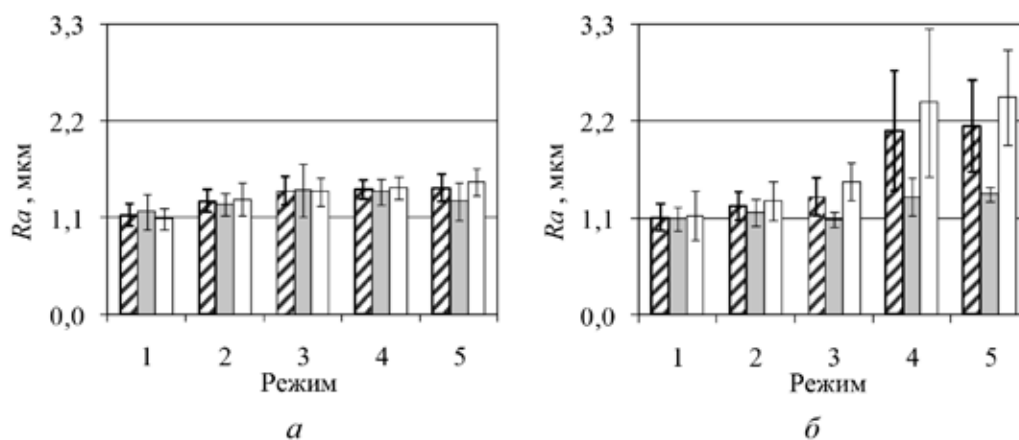


Рис. 3. Среднее значение *Ra* по длине шлифованной поверхности *l*:
а – круг *G*; б – круг *H*; ▨ – вся заготовка; ■ – этап ПДДК; □ – этап выхода

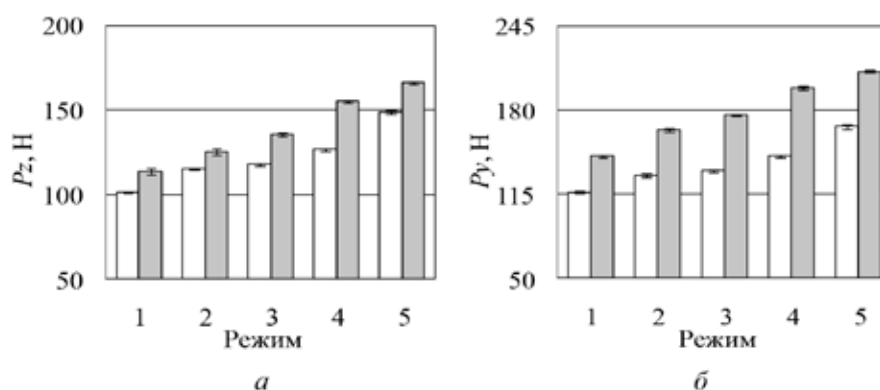


Рис. 4. Средние значения составляющих силы резания на этапе ПДДК:
а – P_z ; б – P_y ; □ – круг G; ■ – круг H

Установлено, что с увеличением режущей способности вне зависимости от твердости круга средние значения составляющих силы резания возрастают. При шлифовании кругом G каждое последующее увеличение Q на $50 \text{ мм}^2/\text{мин}$ приводит к росту P_z в среднем на 10%, росту P_y в среднем на 9%. При шлифовании кругом H и переходе между режимами ГШ рост составляющих силы резания P_z и P_y также составляет 10 и 9% соответственно. Таким образом установлено, что с увеличением режущей способности в большей степени возрастает составляющая силы резания P_z .

Рост P_z , P_y с переходом между режимами обусловлен увеличением q в заданных условиях ГШ (рис. 1). Это подтверждает ранее установленную учеными связь составляющих силы резания и производительности в единицу времени [9, 14].

Установлено, что составляющие силы резания всегда выше при ГШ кругом большей твердости H (рис. 4). Существуют различные виды износа абразивных зерен. Менее твердый круг G интенсивно изнашивается при различных условиях обработки ввиду физических свойств абразивного материала – зерна этого круга подвергаются активному разрушению в ходе постоянной правки алмазным роликом вне зависимости от режима резания. Снижение количества вершин зерен на рабочей поверхности инструмента в результате вырывания зерен из связки способствует снижению температуры в зоне контакта инструмента и заготовки. При шлифовании адгезивно-активного металла вырывание зерен из связки уменьшает налипание обрабатываемого материала на абразивный материал инструмента [14], что также способствует снижению силы резания за счет применения менее твердого круга. Зерна круга H более подвержены истиранию и ме-

нее подвержены вырыванию из связки, чем зерна круга G. В результате истирания зерен образуются площадки износа, что ведет к увеличению силы резания, температуры и, как следствие, большей вероятности образования термических дефектов на поверхности заготовки.

Определяющими факторами при выборе инструмента, рекомендуемого для обработки методом ГШ, являются сила резания и качество поверхности. Таким образом, для ГШ сплава ВТ9 в заданных условиях целесообразно применять круг меньшей твердости 64CF100G12V.

Выводы

1. Значение параметра шероховатости Ra при ГШ изменяется по длине шлифованной поверхности.

2. С увеличением твердости круга от 64CF100G12V до 64CF100H12V среднее значение Ra возрастает только при наиболее грубых режимах ГШ ($Q = 300\text{--}350 \text{ мм}^2/\text{мин}$). При меньшей производительности ГШ в рассмотренных условиях шероховатость титанового сплава не зависит от твердости абразивного инструмента из карбида кремния.

3. При шлифовании кругом 64CF100G12V и $Q = 150\text{--}350 \text{ мм}^2/\text{мин}$ этап ГШ не оказывает значимого влияния на шероховатость. При шлифовании кругом 64CF100H12V этап ГШ оказывает влияние на шероховатость при $Q = 250\text{--}350 \text{ мм}^2/\text{мин}$.

4. Установлено, что увеличение твердости круга при различной производительности процесса приводит к росту среднего значения P_z на этапе ПДДК на 8–15%. Средние значения P_y на этапе ПДДК при шлифовании более твердым кругом 64CF100H12V на 20–35% больше, чем при шлифовании менее твердым кругом 64CF100G12V.

Список литературы

1. Nadolny K. A review on single-pass grinding processes // *Journal of Central South University*. 2013. Vol. 20, Is. 6. P. 1502–1509. DOI: 10.1007/s11771-013-1641-5.
2. Klocke F., Soo S.L., Karpuschewski B. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 64, Is. 2. P. 581–604. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.05.004.
3. Novovic D., Aspinwall D.K., Dewes R.C., Bowen P., Griffiths B. The effect of surface and subsurface condition on the fatigue life of Ti–25V–15Cr–2Al–0.2C%wt alloy // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 65, Is. 1. P. 523–528. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.074.
4. Gostimirovic M., Sekulic M., Rodic D. Surface integrity study of creep-feed grinding // *Applied Engineering Letters*. 2020. Vol. 5, Is. 3. P. 94–103. DOI: 10.18485/aletters.2020.5.3.4.
5. Chen T., Miao Q., Xiong M., Xi X., Zhao B., Pu C., Ding W. On the residual stresses of turbine blade root of γ -TiAl intermetallic alloys induced by non-steady-state creep feed profile grinding // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 82, Is. 2. P. 800–817. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.08.051.
6. Jin T., Ma X., Hu H., Qu M., Shang Z. Inverse approach to derive the distribution of convection heat transfer coefficient of grinding fluid within grinding zone for deep grinding of nickel based super alloy // *Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 58, Is. 15. P. 55–62. DOI: 10.3901/JME.2022.15.055.
7. Jackson M.J., Ruxton V. Creep-feed grinding wheel development for safely grinding aerospace alloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30, Is. 4. P. 2220–2228. DOI: 10.1007/s11665-021-05489-7.
8. Soo S.L., Hood R., Lannette M., Aspinwall D.K., Voice W.E. Creep feed grinding of burn-resistant titanium (BuRTi) using superabrasive wheels // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 53, Is. 9. P. 1019–1026. DOI: 10.1007/s00170-010-2876-z.
9. Носенко С.В., Носенко В.А., Лясин Д.Н., Кременецкий Л.Л. Взаимосвязь составляющих силы резания и мгновенной режущей способности при глубинном шлифовании титанового сплава с постоянной правкой абразивного инструмента // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. № 5. С. 41–51.
10. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. P. 369–374. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.369.
11. Xi X., Zhu Y., Chen T., Wu Z., Anggei L., Ding W. Surface burn behavior in creep-feed deep grinding of gamma titanium aluminide intermetallics: characterization, mechanism, and effects // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 113, Is. 10. P. 985–996. DOI: 10.1007/s00170-021-06677-4.
12. А.с. 810780 СССР, МКИ С 10 М 3/02. Смазочно-охлаждающая жидкость для шлифования титановых сплавов / Саотин Г.И., Носенко В.А., Ляпунов М.И. и др. (СССР). 2690908/23-04; заявлено 30.11.78; опубл. 07.03.81, Бюл. 9. С. 3.
13. Носенко С.В., Носенко В.А., Коряжкин А.А., Кременецкий Л.Л. Влияние скорости глубинного шлифования на морфологию и химический состав поверхности титанового сплава // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 3. С. 62–72.
14. Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга // *Вестник машиностроения*. 2010. № 11. С. 57–61.
15. Носенко В.А., Авилов А.В. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования // *Справочник. Инженерный журнал*. 2009. № 7. С. 10–19.