

УДК 621.923

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ КРУГА ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ И СОСТАВА СОЖ НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

¹Носенко С.В., ¹Носенко В.А., ²Кременецкий Л.Л., ¹Буренина А.П., ¹Сердюков Н.Д.

¹Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волжский, e-mail: nosenko@volpi.ru;

²ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, e-mail: kreleonid@yandex.ru

Статья посвящена исследованию влияния условий глубинного шлифования титанового сплава ВТ9 на высотные, шаговые, гибридные параметры шероховатости обрабатываемой поверхности и износ абразивного инструмента твердостью G и I. Исследование влияния твердости высокопористого, высокоструктурного круга из карбида кремния и состава СОЖ на значения параметров шероховатости и коэффициент шлифования было осуществлено путем анализа экспериментальных данных, обработанных методами математической статистики. На основе полученных данных были построены диаграммы зависимости между исследуемыми параметрами и условиями шлифования. Повышение твердости абразивного инструмента в большей степени оказывает влияние на высотные параметры шероховатости. Состав СОЖ оказывает наибольшее влияние на шероховатость при черновых режимах шлифования. Для обработки на заданных режимах рекомендуется круг твердостью I и СОЖ с присадкой Na_3PO_4 .

Ключевые слова: титановый сплав, глубинное шлифование, твердость круга, шероховатость, смазочно-охлаждающая жидкость, износ, коэффициент шлифования

THE EFFECT OF THE GRADE OF SILICON CARBIDE WHEEL ON ROUGHNESS PARAMETERS AT GRINDING TITANIUM ALLOY

¹Nosenko S.V., ¹Nosenko V.A., ²Kremenetskiy L.L., ¹Burenina A.P., ¹Serdyukov N.D.

¹Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgograd State Technical University, Volzhsky, e-mail: nosenko@volpi.ru;

²Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: kreleonid@yandex.ru

The article is dedicated to the research of effect of creep-feed grinding of titanium alloy «VT9» conditions on amplitude, slope, spacing and counting parameters of surface roughness and wear of abrasive instrument with G and I grades. The research of effect of the grade of highly porous and highly structural silicon carbide wheel and coolant composition on values of roughness parameters and G-ratio was implemented through analysis of experimental data which was calculated with methods of mathematical statistics. Figures of relations between investigated parameters and grinding conditions are shown. It is shown that increase of grade of abrasive instrument has the greatest impact on amplitude parameters of surface roughness. Coolant composition has the greatest impact on surface roughness at rough modes of grinding. The wheel with I grade and coolant with the Na_3PO_4 additive are recommended for grinding at presented modes.

Keywords: titanium alloy, creep-feed grinding, grade of abrasive instrument, surface roughness, coolant, wear, g-ratio

Основной причиной плохой обрабатываемости титановых сплавов шлифованием является их высокая адгезионная активность [1]. При глубинном шлифовании, отличительной особенностью которого является большая длина дуги контакта, интенсивность адгезионного взаимодействия возрастает [2–5], что затрудняет получение обработанной поверхности с заданными параметрами шероховатости.

Существенное влияние на шероховатость поверхности оказывают характеристика абразивного инструмента [6, 7], режимы шлифования [8, 9] и состав смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [10].

В соответствии с ГОСТ 25142-82 параметры шероховатости подразделяются на высотные, шаговые и связанные с формой неровности профиля (гибридные). В ряде научных работ отражены результаты ис-

следований влияния условий шлифования на один из высотных параметров – среднее арифметическое отклонение профиля Ra [3, 9, 11–13]. Исследование прочих параметров шероховатости также имеет теоретический и практический интерес. Целью данной работы является исследование влияния условий обработки титанового сплава на высотные, шаговые и связанные с формой неровности профиля (гибридные) параметры шероховатости поверхности.

Материалы и методы исследования

В качестве обрабатываемого материала выбран титановый сплав ВТ9. Размер образцов $46,5 \times 38 \times 16$ мм. Шлифование проводили на прецизионном плоскошлифовальном станке с ЧПУ CHEVALIER модели «Smart-V1224П». Для обработки использовались высокопористые круги из карбида кремния

64CF100G12V и 64CF100I12V (далее круги *G* и *I*). Каждый опыт повторяли три раза.

Режимы обработки выбраны с учетом производственного опыта: подача на глубину $S_t = 0,15$ мм, число проходов $n = 12$, скорость подачи стола $v = 400$ мм/мин (режим 1); $S_t = 0,1$ мм, $n = 12$, $v = 500$ мм/мин (режим 2); $S_t = 0,05$ мм, $n = 12$, $v = 500$ мм/мин (режим 3); $S_t = 0$ мм, $n = 2$, $v = 500$ мм/мин (режим 4, выхаживание). Скорость шлифования – 25 м/с.

Перед каждым опытом периферию абразивного круга правили алмазно-металлическим карандашом 3908-0051 ГОСТ 607-80: вертикальная подача 0,010 мм/ход, поперечная скорость перемещения – 150 мм/мин.

Использовали СОЖ на водной основе: сода кальцинированная Na_2CO_3 – 0,5% (СОЖ 1); натрий фосфорнокислый трехзамещенный Na_3PO_4 – 4%, гексаметафосфат натрия (NaPO_3)₆ – 0,8%, сода кальцинированная Na_2CO_3 – 0,3% (СОЖ 2). Расход СОЖ – 14 л/мин.

Шероховатость поверхности измеряли профилографом-профилометром «СЕЙТРОНИК ПШ8-4 С.С.». Предел допускаемой основной относительной погрешности прибора $\pm 5\%$. Контроль шероховатости поверхности осуществляли в 10 сечениях, равномерно распределенных по всей длине образца. Длина базовой линии $l = 2,5$ мм.

Износ круга измеряли многооборотным индикатором типа «МИГ» ГОСТ 9696-82. Съем металла определяли как разность между заданным припуском, равным производству S на количество ходов n , и износом круга h . По съему металла и износу круга рассчитывали коэффициент шлифования $K_G = (S_t n - h) / \pi D h$, где D – фактический диаметр шлифовального круга.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунках приняты следующие обозначения: первая прописная латинская буква означает твердость инструмента, далее указан параметр шероховатости обработанной поверхности. Например, $G R_{max}$ означает, что заготовку титанового сплава обрабатывали кругом твердостью G , анализируемый параметр шероховатости обработанной поверхности R_{max} – наибольшая высота неровности профиля.

С увеличением твердости круга на две степени с G до I высотные параметры шероховатости возрастают в 1,3–1,8 раза при использовании СОЖ 1 (рис. 1, *a*). Наибольшее отличие высотные параметры R_a , R_{max} , R_z , R_p , R_v , R_q имеют на первых двух режимах: для круга твердостью I все параметры на 25–30% меньше, чем для круга G . На ре-

жимах 3 и 4 различие между параметрами от твердости круга снижается до 20–22%. Параметры R_a , R_{max} , R_z при переходе от режима 1 к режиму 4 изменяются одинаково – их значения по обоим кругам снижаются в 1,1–1,4 раза. Параметры R_p и R_v при переходе от режима 1 к режиму 4 при обработке кругом G снижаются в среднем в 1,4–1,6 раза, а при обработке кругом I – в 1,3 раза. Из этого следует, что влияние режимов шлифования в большей степени отражается на круге меньшей твердости.

С переходом от СОЖ 1 к СОЖ 2 значения всех высотных параметров шероховатости снижаются: для круга твердостью I в 0,9–1,6 раза, для круга меньшей твердости G в 1,7–2,2 раза (рис. 1, *б*). При обработке кругом G , с переходом от режима 1 к режиму 3, все параметры снижаются в 1,1–1,3 раза, с переходом от чистового режима к режиму с выхаживанием – в 1,3–1,7 раза. Для круга I параметры R_{max} и R_z , R_p снижаются в 1,2 раза; параметры R_a , R_v и R_q – в 1,1–1,4 раза.

В соответствии с ГОСТ 25142-82 для нормирования шероховатости поверхности установлены следующие шаговые параметры: S_m – среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины; S – среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины; λq – средняя квадратическая длина волны профиля, λa – средняя длина волны профиля. Параметры λq и λa позволяют проводить дополнительный анализ состояния поверхности, предпочтительны для определения коэффициента парной корреляции с высотными параметрами.

Значения шагового параметра S_m при обработке кругами различной твердости на СОЖ 1 отличаются в 1,1–1,2 раза. Влияние твердости на значения параметра S незначимо. С переходом от режима 1 к режиму 4 значения параметров S и S_m при обработке кругом I снижаются на 6% и 11% соответственно. При обработке кругом меньшей твердости значения S снижаются всего на 3%, значения S_m – на 13%. С переходом от СОЖ 1 к СОЖ 2 шаговый параметр S уменьшается незначительно – в 1,1–1,2 раза, параметр S_m снижается для круга твердостью I в 1,1–1,5 раза, для круга G – в 1,1–1,4 раза.

Как при СОЖ 1, так и при СОЖ 2 значения параметра λq при шлифовании кругом G выше в 1,2–1,4 раза, чем кругом I . С переходом одного режима к другому значения данного параметра снижаются в 1,4 раза по обоим кругам при СОЖ 1. На СОЖ 2 значения λq снижаются с переходом от режима 1 к режиму 2 на 5%, с переходом от режима 2 к режиму 3 – на 10%, с переходом к режиму 4 – еще на 2%.

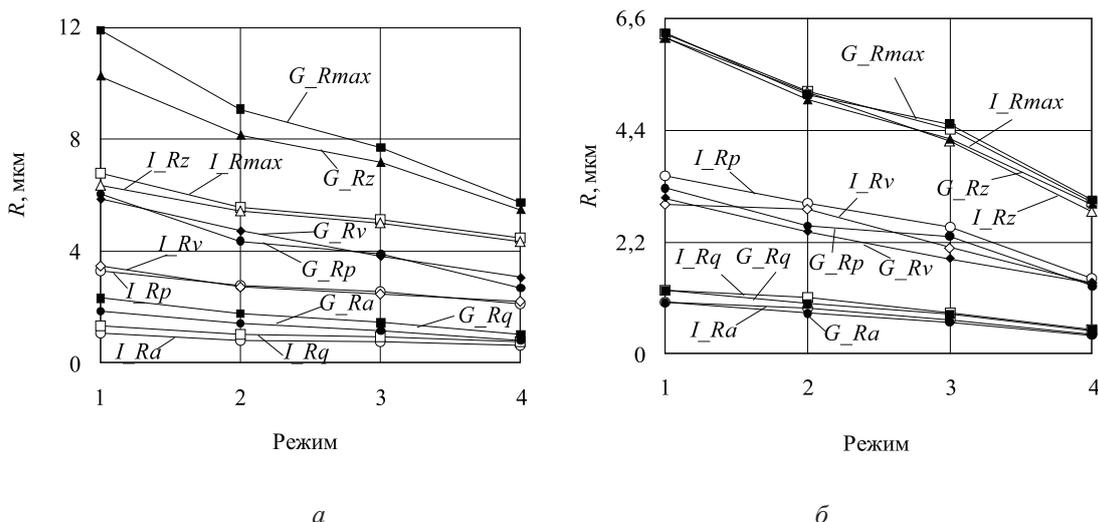


Рис. 1. Влияние твердости круга, режимов шлифования и состава СОЖ на высотные параметры шероховатости: 1 – режим 1; 2 – режим 2; 3 – режим 3; 4 – режим 4. а) СОЖ 1, б) СОЖ 2

Значения параметра λ_a при обработке кругами разной твердости на СОЖ 1 отличаются в меньшей степени, чем λ_q – в 1,0–1,2 раза, то есть влияние твердости круга незначимо. С уменьшением подачи на глубину S_f разница между значениями данного параметра также сокращается – с 27% до 23%. С уменьшением режимов значения параметров снижаются незначительно – в 1,1–1,3 раза для круга G и в 1,0–1,2 раза для круга I . С использованием СОЖ 2 значения λ_a при обработке кругами разной твердости отличаются в 1,1 раза. Со сменой режимов значения снижаются на 15% для круга G и на 14% для круга I , т.е. влияние режимов на данный параметр при шлифовании кругами различной твердости одинаково.

Относительная опорная длина профиля tp комплексно характеризует высоту и форму неровностей профиля, данный параметр аналогичен функции распределения. Сравнивая значения параметра tp , полученные при шлифовании кругами различной твердости на СОЖ 1, можно сказать, что площадь материала, отсекаемая на заданном уровне p , увеличивается в 1,3–1,8 раза быстрее при шлифовании кругом I , чем при шлифовании кругом G . Так, максимальное значение tp на режиме I при шлифовании кругом G соответствует $R_{max} = 11,9$ мкм, а при шлифовании кругом большей твердости I максимальное значение tp соответствует $R_{max} = 6,3$ мкм. Сравнивая значения параметра tp , полученные при шлифовании кругами

различной твердости на СОЖ 2, можно сказать, что значения данного параметра с переходом от режима 1 к режиму 4 изменяются одинаково.

Значения среднеарифметического наклона профиля Δa при обработке кругом G в 1,3–1,4 раза выше, чем кругом I (рис. 2). Значения данного параметра с изменением режимов обработки от 1 до 4 при использовании круга G изменяются в 1,2 раза, с использованием круга I – в 1,1 раза. Параметр среднеквадратического наклона профиля Δq с уменьшением подачи на глубину для кругов различной твердости практически не изменяется.

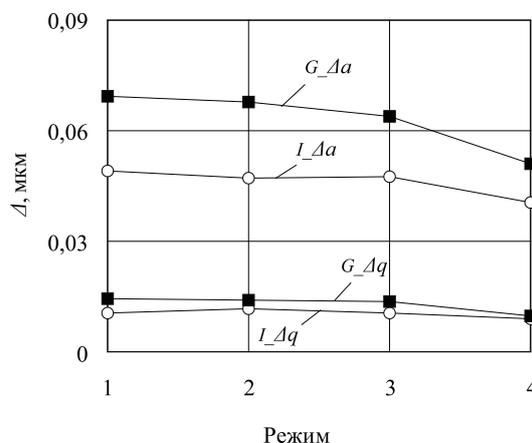


Рис. 2. Влияние твердости шлифовального круга на гибридные параметры Δq и Δa : 1 – режим 1; 2 – режим 2; 3 – режим 3; 4 – режим 4

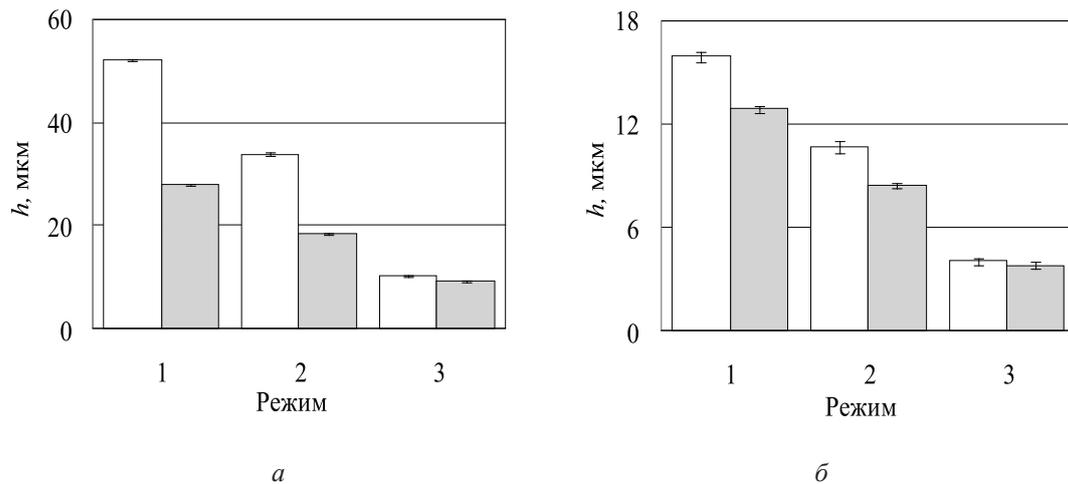


Рис. 3. Влияние твердости круга на радиальный износ круга h при шлифовании с охлаждением СОЖ 1 (а) и СОЖ 2 (б): □ – круг твердостью G ; ■ – круг твердостью I .
1 – режим 1; 2 – режим 2; 3 – режим 3

С переходом от СОЖ 1 к СОЖ 2 снижение значений гибридных параметров в большей степени наблюдается при обработке кругом твердостью G . При использовании СОЖ 2, в отличие от СОЖ 1, значения Δa при обработке кругом большей твердости I в 1,1–1,2 раза выше, чем кругом G . Значения Δa со сменой режимов от 1 до 4 при обработке кругом G снижаются в 1,1–1,4 раза.

Режим обработки оказывает существенное влияние на коэффициент шлифования K_G и радиальный износ h инструмента из карбида кремния [14]. Рассмотрим закономерности изменения данных показателей в условиях обработки кругами твердостью G и I при использовании СОЖ различных составов.

При шлифовании на черновом режиме 1 с увеличением твердости круга на две степени K_G возрастает в 1,90 раза, полустойкой режим 2 характеризует рост K_G в 1,84 раза. С переходом от режима 1 к режиму 2 при шлифовании кругом G K_G возрастает всего на 4%, при шлифовании кругом I – на 1%. С переходом от режима 2 к чистовому режиму 3 при шлифовании кругом G K_G возрастает в 1,64 раза, на круге I – всего на 3%. Значения K_G на режиме 4 практически не изменились по сравнению со значениями K_G на режиме 3, так как после чистового режима правка круга не выполнялась.

С охлаждением СОЖ 2 на режиме 1 по сравнению с СОЖ 1 для кругов G и I K_G увеличивается соответственно в 3,3 и 2,5 раза. С переходом к режиму 2 K_G для кругов G и I увеличивается практически в той же степени – в 3,3 и 2,3 раза. На режиме 3 K_G кругов G и I увеличивается в 2,5–2,6 раза по

сравнению с СОЖ 1. Таким образом, при шлифовании на более жестких режимах наибольшее влияние СОЖ оказывает на K_G круга меньшей твердости.

При использовании СОЖ 2 с увеличением твердости круга от степени G до I K_G на более жестких режимах 1 и 2 увеличивается в 1,3 раза, что на 40–50% меньше, чем при шлифовании с СОЖ 1. На чистовом режиме 3 различие между кругами G и I по K_G не превышает 10%. Из этого следует, что наибольшее влияние твердости круга на коэффициент шлифования прослеживается при обработке на более жестких режимах с охлаждением СОЖ 1.

Выбор режима резания непосредственно влияет на износ круга h . Круг большей твердости изнашивается меньше, что подтверждается значениями h (рис. 3). С переходом от режима 1 к режиму 2 и, соответственно, уменьшением подачи на глубину S_f на треть, h круга G снижается на 53%, h круга I снижается на 50%. Уменьшение S_f до 0,05 мм/ход обеспечивает уменьшение h в 3,3 раза в случае круга G , и в 2,0 раза в случае круга I . Изменение режима резания в большей степени отражается на круге G , но износ данного абразивного инструмента во всех случаях выше, чем у круга I . Так, при режимах 1 и 2 круг G изнашивается на 85% больше круга I , а при самом мягком из представленных режимов обработки h круга G на 10% превышает этот же показатель круга I . Данные закономерности позволяют полагать, что более подходящим инструментом для обработки на заданных режимах является круг I .

Выявлена закономерность – с уменьшением h параметр Ra снижается. Существенно различаются между собой данные, полученные при шлифовании с охлаждением СОЖ 1 кругами различной твердости: Ra поверхности, полученной кругом G , в среднем на 60% больше Ra поверхности, полученной кругом I ; h круга G в среднем на 70% больше, чем h круга I . На СОЖ 2 различие в средних значениях Ra между кругами твердостью G и I составляет всего 6%, различие в h – более 20%, т.е. при существенном различии в h кругов G и I разница в значениях Ra обработанных поверхностей незначительна. Значимое различие получено только при шлифовании на режиме 2.

Выводы

В большей степени со сменой режимов от 1 до 4 изменяются высотные параметры. Значения всех параметров шероховатости выше при обработке кругом меньшей твердости G . Наибольшее влияние на шероховатость состав СОЖ оказывает при шлифовании кругом G на черновых режимах. Наибольшее влияние твердости круга на параметры шероховатости прослеживается при обработке на более жестких режимах с охлаждением СОЖ 1. Для обработки титанового сплава ВТ9 в рассмотренных режимах шлифования рекомендуется круг твердостью I , обеспечивающий наименьшие значения параметров шероховатости обработанной поверхности и отсутствие шлифовочных прижогов при меньшем износе инструмента.

Список литературы

1. Носенко В.А. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / В.А. Носенко, С.В. Носенко, А.В. Авилов и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 3. – С. 66–71.
2. Xipeng Xu, Yiqing Yu. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // *Wear*. – 2003. – Vol. 255, № 7. – P. 1421–1426.
3. Носенко С.В. Влияние правки абразивного инструмента и направления движения стола на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании заготовок из титановых сплавов / С.В. Носенко, В.А. Носенко, А.А. Байрамов // *СТИН*. – 2015. – № 1. – С. 21–26.
4. Силин С.С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
5. Худобин Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет. – 2007. – 299 с.
6. Солер Я.И. Повышение эффективности использования карбидкремниевых абразивных кругов при плоском шлифовании титанового сплава ВТ20 / Я.И. Солер, Д.Ш. Май // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2016. – № 8(115). – С. 43–55.
7. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
8. Hood R., Lechner F., Aspinwall D.K., Voice W. Creep feed grinding of gamma titanium aluminide and burn resistant titanium alloys using SiC abrasive // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47, № 9. – P. 1486–1492.
9. Носенко В.А. Шероховатость поверхности при плоском глубинном шлифовании титанового сплава / В.А. Носенко, А.А. Васильев, С.В. Носенко // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2007. – № 9. – С. 66–70.
10. Полетаев В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин / В.А. Полетаев, Д.И. Волков. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
11. Калинин С.В. Получение шероховатости высокой чистоты на поверхности штока гидроцилиндра из титанового сплава ВТ-6 / С.В. Калинин, А.О. Григарин // *Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-практической конференции*. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2015. – С. 160–162.
12. Солер Я.И. Выбор абразивных кругов при маятниковом шлифовании деталей из титанового сплава ВТ22 по высотным параметрам шероховатости / Я.И. Солер, Д.Ш. Май // *Обработка металлов*. – 2015. – № 4 (69). – С. 18–30.
13. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава ВТ8-М / Д.Н. Степанов // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. – 2012. – № 2. – С. 90–97.
14. Носенко С.В. Влияние СОТС и твердости круга на коэффициент шлифования и шероховатость поверхности при обработке титанового сплава / С.В. Носенко, В.А. Носенко, Л.Л. Кременецкий, Н.Д. Сердюков // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2016. – № 12 (54) Часть 3. – С. 156–161.