

**ЗАВИСИМОСТЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ОТ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ****А. В. Гуторов*, И. К. Чайка, А. Язан, Г. В. Романова, А. А. Петров, М. Я. Афанасьев***Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*** gut-111@mail.ru*

Аннотация. Метод лазерной абляции обладает существенными преимуществами при обработке заготовок из твердых материалов, поскольку обеспечивает удаление материала без износа формообразующего инструмента и нагрузки на заготовку. Описан метод обработки карбида вольфрама с использованием лазерной абляции наносекундной длительности импульсов. Представлены результаты анализа морфологии поверхности карбида вольфрама после воздействия коротких лазерных импульсов. Шероховатость обработанной поверхности исследована методом контактной профилометрии. Исследовано влияние параметров лазерного воздействия (частота следования импульсов, длительность импульсов) на геометрические параметры (глубина абляции и шероховатость) поверхности заготовок из карбида вольфрама. Установлено, что с увеличением плотности энергии, длительности импульса и повышением коэффициента перекрытия лазерных импульсов увеличивается шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что тангенциальная стратегия лазерной обработки обеспечивает наилучшее качество поверхности.

Ключевые слова: импульсная лазерная абляция, наносекундный лазер, карбид вольфрама, производство микроинструментов, лазерная обработка.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке программы „Приоритет 2030“.

Авторы выражают особую благодарность проф., д.т.н. В. П. Вейко за ценные комментарии и предложения.

Ссылка для цитирования: Гуторов А. В., Чайка И. К., Язан А., Романова Г. В., Петров А. А., Афанасьев М. Я. Зависимость шероховатости поверхности сплавов на основе карбида вольфрама от параметров лазерной абляции // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 6. С. 545–556. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-545-556.

**DEPENDENCE OF SURFACE ROUGHNESS OF TUNGSTEN CARBIDE ALLOYS ON LASER ABLATION
PARAMETERS****A. V. Gutorov*, I. K. Chaika, A. Yazan, G. V. Romanova, A. A. Petrov, M. Ya. Afanasyev***ITMO University, St. Petersburg, Russia*** gut-111@mail.ru*

Abstract. The laser ablation method has significant advantages in processing workpieces from hard materials, since it ensures the removal of material without wear of the forming tool and load on the workpiece. A method for processing tungsten carbide using laser ablation of nanosecond pulse duration is described. The results of the analysis of the tungsten carbide surface morphology after exposure to short laser pulses are presented. The roughness of the processed surface is studied using the contact profilometry method. The effect of laser exposure parameters (pulse repetition rate, pulse duration) on the geometric parameters (ablation depth and roughness) of the surface of tungsten carbide workpieces is studied. It is found that with an increase in energy density, pulse duration and an increase in the overlap coefficient of laser pulses, the roughness of the processed surface increases. The tangential laser processing strategy is shown to provide the best surface quality.

Keywords: pulsed laser ablation, nanosecond laser, tungsten carbide, micro-tool manufacturing, laser processing

Acknowledgments: The work was carried out with the support of the Priority 2030 program.

The authors express special gratitude to Prof. V. P. Veiko, Doctor of Engineering Sciences, for valuable comments and suggestions.

For citation: Gutorov A. V., Chaika I. K., Yazan A., Romanova G. V., Petrov A. A., Afanasyev M. Ya. Dependence of surface roughness of tungsten carbide alloys on laser ablation parameters. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 6. P. 545–556 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-545-556.

Введение. В настоящее время в промышленности все чаще используются инструменты, созданные из сверхтвердых материалов, таких как нитрид бора и поликристаллический алмаз, карбид вольфрама. Производство режущего инструмента из таких материалов зачастую осложнено износом формообразующих инструментов и разрушением заготовок в процессе обработки. Ввиду перехода к цифровизации производства, которая характеризуется увеличением спроса на высокую точность, снижением количества брака и кастомизацией товара, требуется повышение качества обрабатываемых инструментов при уменьшении времени их изготовления и переналадки оборудования. Благодаря свойствам лазерного излучения импульсная лазерная абляция обеспечивает высокую гибкость и точность обработки вне зависимости от механических свойств обрабатываемого материала. Это позволяет разрабатывать новые технологии изготовления инструментов из сверхтвердых сплавов для промышленности [1].

Особый интерес представляет область микрообработки, которая становится все более востребованной в различных отраслях промышленности. Современные технологии требуют все более точного и качественного производства мелких деталей и изделий, что обуславливает необходимость создания специализированных микроинструментов для их изготовления. Миниатюризация изделий позволяет увеличить число интегрированных функций, удобство изделий, снизить их вес, а также понизить потребление энергии и ресурсов в процессе производства и эксплуатации. С развитием полупроводниковых приборов электрические схемы стали значительно компактнее. Интегральные схемы теперь требуют микродеталей, а в печатных платах необходимо формировать микроотверстия. Реле и переключатели также должны быть изготовлены из механических деталей малых размеров. Иным примером является технология производства форсунок для впрыска топлива в автомобилях, которая также требует формирования микроотверстий. Миниатюризация медицинских инструментов также является важным направлением ввиду необходимости обеспечения безболезненного проведения обследований и операций.

Микрообработка с применением твердосплавных режущих инструментов является одной из ключевых технологий, позволяющих реализовать все вышеперечисленные требования к микроизделиям [2]. Мировой рынок режущих микроинструментов переживает значительный рост благодаря точности и универсальности, предлагаемым технологиями микрорезки [3, 4]. В России рынок режущих микроинструментов также демонстрирует многообещающие перспективы благодаря развитию нестандартных микрофрез и разработке специализированных микротокарно-фрезерных станков для изготовления микродеталей различного сечения [5]. Тенденции показывают растущий спрос на технологии микрообработки как на мировом, так и на российском рынках, подчеркивая важность интегрированных процессов проектирования и производства для удовлетворения промышленных потребностей и стимулирования дальнейшего расширения рынка.

Традиционным методом формирования геометрии режущего инструмента является шлифование кругами с алмазным абразивом. Как отмечают в своей работе М. Варханек и др. [1], наибольшую сложность при проектировании и изготовлении режущего инструмента представляет формирование спиральной канавки. Ряд исследований посвящен оптимизации технологического процесса шлифования, в частности, Абеле и Фухара [6] предложили метод оптимизации с учетом геометрических ограничений кинематики процесса шлифования и геометрии абразивного круга. В свою очередь, Я. К. Ауриху и др. [7] с помощью данной технологии удалось изготовить микрофрезу диаметром 10 мкм менее чем за 10 минут и успешно провести с ее помощью обработку резанием.

Тем не менее, технология шлифования обладает рядом существенных недостатков, таких как геометрические ограничения абразивных кругов, их износ, а также высокие механические нагрузки в процессе обработки заготовок. Последнее ограничение особенно критично в случае изготовления микроинструмента, поскольку механическая нагрузка на тонкий стержень заготовки из твердых сплавов и сверхтвердых материалов зачастую приводит к браку или повреждению. По этой причине активно проводятся исследования альтернативных технологий

производства режущего инструмента из твердых сплавов. С помощью данной технологии Чжану и др. [8] удалось сформировать высокоточные структуры на поверхности заготовок из поликристаллического алмаза (PCD), изготовить фрезу и с ее помощью провести обработку карбида вольфрама. Исследованию технологии производства микроинструмента методом электроэрозионного шлифования проволокой (WEDG) посвящена работа К. Егаширы и др. [9]. Данная технология применена для изготовления фрез и сверл из цементированного карбида вольфрама диаметром до 3 мкм с последующими экспериментами по микросверлению и микрофрезерованию. Микросверление проводилось на глубину 2 мкм при различных режимах резания, а диаметр всех полученных отверстий составил 4 мкм. Из анализа результатов экспериментов сделан вывод, что подача незначительно влияет на итоговое отклонение. Ченгом и др. [10] представлена комплексная САМ-система для поддержки технологии формирования спиральной геометрии режущего инструмента методом WEDG. Несмотря на ряд преимуществ, EDM и подобные ей технологии обладают существенным недостатком, который заключается в отсутствии возможности проводить обработку диэлектрических материалов. Примером таких материалов являются кубический нитрид бора, а также различного рода керамика.

Другим технологическим процессом, позволяющим осуществлять обработку твердых и сверхтвердых материалов вне зависимости от электропроводящих свойств, является импульсная лазерная абляция (PLA). М. Варханек утверждает, что впервые технология лазерной обработки профилированных вращающихся инструментов описана Дж. Тиммером [11]. В дальнейшем данная технология использована Уолтером и др. [12] для правки и лазерного шлифования инструментов из алмаза и сверхтвердых абразивов. М. Варханеком и др. [1] проведен сравнительный анализ свойств режущего инструмента, изготовленного как с помощью EDM, так и методом PLA. В рамках этого исследования изготовлено несколько сверл диаметром 2 мм из поликристаллического алмаза со значениями шероховатости около 150 нм. Сравнение износа инструментов после формирования 80 отверстий показало, что сильный боковой износ можно увидеть на обоих типах инструментов, однако на режущих кромках инструментов, изготовленных при помощи EDM, можно заметить большие зазоры, что свидетельствует о преимуществах лазерной обработки.

Исследование, проведенное Ж. Таном [13], демонстрирует, что лазерная абляция цементированного карбида вольфрама не вызывает побочных эффектов, которые препятствовали бы его использованию для изготовления микроинструментов, однако процесса доводки избежать не всегда возможно.

В работе Б. Смита [14] представлены результаты фундаментального исследования по использованию пикосекундного лазера мощностью 300 Вт для глубокой механической обработки карбида вольфрама. Установлено, что частота следования лазерных импульсов и скорость сканирования оказывают минимальное влияние на скорость абляции при высоких уровнях мощности. Также утверждается, что абляция при низкой длительности импульса приводит к увеличению скорости удаления материала и как следствие — к большей глубине абляции. Однако стоит отметить, что шероховатость поверхности удаляемой области также увеличивается с ростом глубины абляции. При всех экспериментах формировался угол сужения боковых граней. Автор утверждает, что это явление может быть устранено не путем изменения параметров лазерного воздействия, а только путем изменения угла падения луча.

В исследовании К. Ляйца и др. [15] выполнен сравнительный анализ процессов абляции металла под воздействием микро-, нано-, пико- и фемтосекундных лазерных импульсов. Установлено, что из всех исследованных лазерных систем наносекундная обеспечивает самую высокую эффективность абляции в расчете на приложенную энергию.

В работе [16] описано применение ультракоротких лазерных импульсов в промышленности при изготовлении сверл из поликристаллического алмаза и карбида вольфрама с целью более широкого распространения лазерных технологий в индустрии производства режущего инструмента. Применение аналогичной восьмиосевой лазерной установки для формирования сферической поверхности микроинструмента с диаметром 100 мкм описано в работе Дж. Пфаффа

и др. [17]. Более того, результаты исследования процесса лазерной обработки совпадают с выводами из работы [14] о росте скорости абляции при уменьшении длительности импульса.

Можно сделать вывод, что лазерная обработка является прецизионным, эффективным и универсальным методом для решения обозначенных выше задач, что делает ее идеальным инструментом для работы с микроизделиями. Высокая мощность, возможность локализации энергии на площадке малых размеров и простота управления перемещением пучка по заданной сложной траектории, в том числе трехмерной, создают широкие возможности использования лазерного излучения для изготовления режущего инструмента с рабочими поверхностями сложных форм из твердых сплавов и сверхтвердых материалов. Тем не менее, большинство исследований посвящены изучению процесса обработки твердых сплавов при помощи источников пикосекундного и фемтосекундного лазерного воздействия, обладающих меньшей производительностью и большей, в сравнении с наносекундными лазерными установками, стоимостью. Результаты, полученные К. Ляйцом и др. [12], свидетельствуют об эффективности лазерной обработки наносекундной длительности импульсов, что благодаря распространенности источников таких лазеров позволяет сделать вывод о возможности использования наносекундного лазерного воздействия в качестве основного инструмента обработки заготовок из твердых сплавов.

Целью настоящей работы является исследование режимов лазерного воздействия наносекундной длительности импульсов на геометрические характеристики поверхности заготовок, изготовленных из твердого сплава. Необходимо исследовать оптимальные параметры лазерной обработки, которые обеспечивают максимальное качество поверхности после воздействия. Это включает в себя анализ плотности энергии импульса, частоты следования импульсов и коэффициента перекрытия пятен при сканировании, а также их влияния на механические свойства обработанной поверхности.

Результаты настоящего исследования будут служить основой для выбора наиболее эффективного метода обработки заготовок из твердых сплавов. Это необходимо для достижения оптимальной геометрии микродеталей и режущего инструмента, что, в свою очередь, существенно влияет на их эксплуатационные характеристики. В процессе изготовления инструмента одним из ключевых факторов является качество поверхности его режущих кромок, так как оно напрямую связано с производительностью и сроком службы инструмента. Поэтому особое внимание будет уделено анализу шероховатости обработанной поверхности. Изучение взаимосвязи параметров лазерного воздействия и шероховатости деталей может способствовать улучшению технологий лазерной обработки и повышению эффективности производства изделий из твердого сплава.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели будет применен экспериментальный метод наносекундной лазерной обработки поверхности заготовок из твердого сплава. Основным инструментом формирования геометрических элементов на поверхности твердосплавных заготовок является абляция материала под воздействием наносекундных лазерных импульсов при различных режимах лазерного воздействия.

Основным инструментом исследования является волоконный источник лазерного излучения ближнего ИК-диапазона. Основные характеристики экспериментальной установки (рис. 1): длина волны 1064 нм, максимальная средняя мощность 20 Вт, длительность импульса от 4 до 200 нс, максимальная частота следования импульсов 1 МГц, скорость сканирования до 8000 мм/с. Диаметр лазерного пятна 50 мкм, а фокусное расстояние 160 мм.

Объектом исследования являются прямоугольные заготовки из твердого сплава VHS11, изготавливаемого ООО „Вириал“, его особенностью является полидисперсный зерновой состав из субмикронных и наноразмерных зерен карбида вольфрама, синтезированных при различной температуре. Подобный состав твердого сплава обеспечивает высокую ударную вязкость, прочность при изгибе, твердость и износостойкость. Инструменты, изготовленные из данного сплава, способны обеспечивать обработку нержавеющей стали, жаропрочных сплавов, чугунов и цветных металлов.

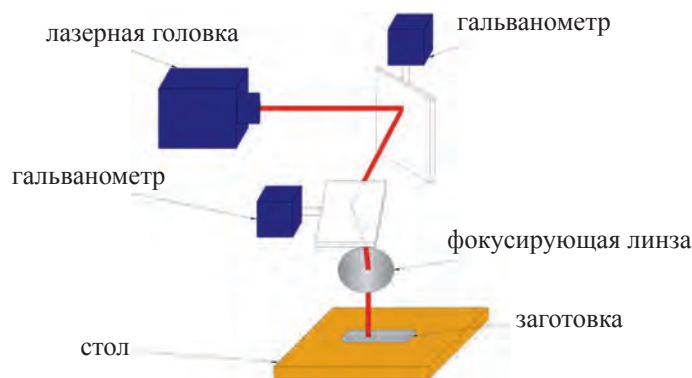


Рис. 1

С целью характеристики особенностей геометрических изменений поверхностных слоев изделий после лазерного воздействия использованы методы оптической микроскопии и контактной профилометрии. Для определения величины неровностей поверхности после лазерной обработки использован контактный профилометр HOMMEL TESTER T8000. Морфология полученных структур исследуется с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Imager A1 и сканирующего электронного микроскопа Zeiss SUPRA 40VP.

Лазерная обработка заключалась в формировании областей прямоугольной формы на поверхности заготовок из твердого сплава. На рис. 2, а приведена модель обработанной заготовки длиной 18 мм, шириной 3 мм и высотой 2 мм, размер обработанных областей $0,8 \times 2$ мм, расстояние между областями 0,5 мм; б — схема сканирования поверхности лазерными импульсами. Зона лазерной обработки расположена таким образом, чтобы часть обрабатываемой площади выходила за пределы твердосплавного образца. Таким образом, в процессе обработки формировалось поперечное сечение, необходимое для дальнейшего исследования качества поверхности и глубины абляции h .

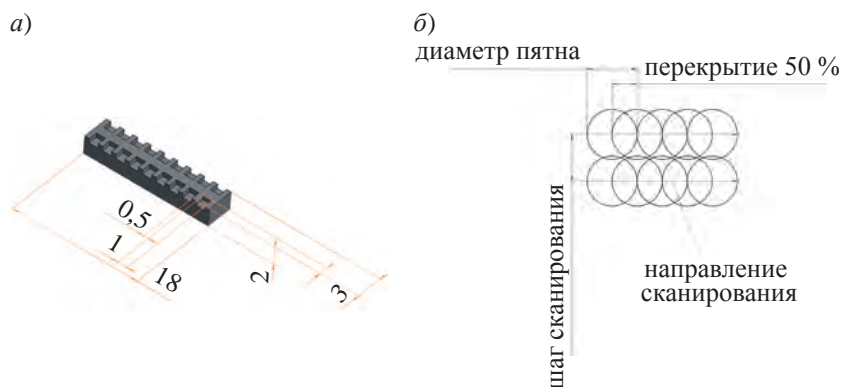


Рис. 2

Плотность энергии одиночного импульса F_p (Дж/см²) определяется формулой [18]:

$$F_p = \frac{4P_m}{\pi f d_f^2}, \quad (1)$$

где P_m — импульсная мощность (Вт), установленная путем измерения; f — частота следования импульсов (кГц); d_f — диаметр лазерного пятна (мкм) выбранной установки.

Распределение энергии по всей площади сканирования можно оценить, введя параметр плотности энергии серии импульсов на единицу площади F_A (Дж/см²). Данный параметр определяется формулой:

$$F_A = \frac{P_m f}{v_f^2}, \quad (2)$$

где v_f — скорость сканирования (мм/с).

Первой задачей исследования является выявление взаимосвязи режимов наносекундного лазерного воздействия и глубины абляции. Входными параметрами являются частота следования импульсов f , принимающая значения 10, 20, 30, 50, 70 и 90 кГц, длительность импульса τ , принимающая значения 4, 30, 50 и 200 нс, а также величина перекрытия пятен при сканировании P_o , принимающая значения в интервале от 50 до 90 % с шагом 10 %. С целью обеспечения возможности измерения глубины абляции выполнено 50 проходов для каждого режима.

Результаты и обсуждение. На рис. 3 представлена зависимость глубины абляции от плотности энергии на единицу площади F_A при разной частоте следования импульсов f , при длительности импульса 30 нс и постоянной плотности энергии одиночного импульса $F_p = 11,1$ Дж/см²; на рис. 4 — при $\tau = 50$ нс, $F_p = 15,6$ Дж/см²; 5 — при $\tau = 200$ нс. На каждом графике наблюдается явная тенденция к увеличению глубины абляции при возрастании плотности энергии на единицу площади. Из анализа рисунка можно сделать вывод о влиянии длительности наносекундного лазерного импульса на глубину абляции при постоянной плотности одиночного импульса.

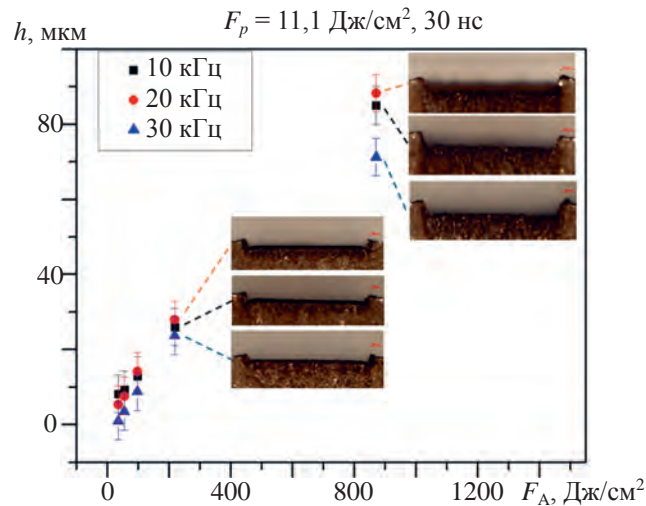


Рис. 3

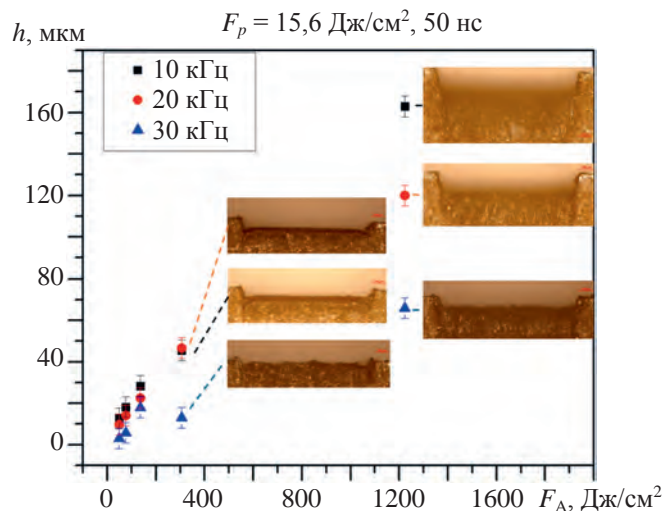


Рис. 4

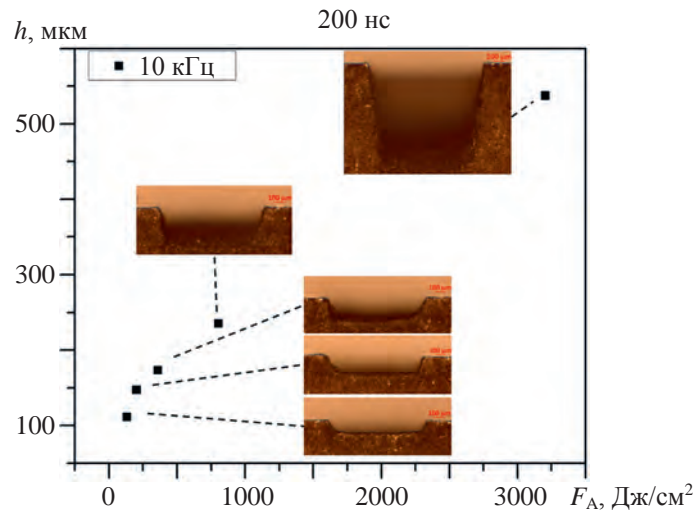


Рис. 5

Данные рис. 3–5 свидетельствуют о значительном уменьшении глубины абляции при снижении энергии импульса с сохранением постоянного перекрытия. Следует отметить, что при определенных режимах лазерного воздействия наблюдается вытеснение расплава над поверхностью заготовки, что влечет за собой формирование выступов. Это явление может быть обусловлено несколькими факторами. По мере увеличения частоты сканирования повышается температура поверхности обрабатываемого материала в промежутках между импульсами. Следствием недостатка охлаждения является повышенное образование жидкой фазы материала в зоне обработки, влияющее на качество поверхности.

Также важно отметить, что при обработке площадь обрабатываемого прямоугольника сокращается по мере увеличения глубины абляции вследствие расфокусировки излучения и, как следствие, уменьшения плотности энергии. Подобное явление также характерно для лазерного воздействия пикосекундной длительности импульсов [14].

Представленные на рис. 6 графики иллюстрируют изменение глубины абляции в зависимости от коэффициента перекрытия пятен импульсов для диапазона частот от 10 до 30 кГц с шагом 10 кГц и длительности импульсов 30 (а), 50 (б) и 200 нс (в). С увеличением коэффициента перекрытия пятен и пропорциональным уменьшением расстояния между линиями сканирования наблюдается резкий рост глубины абляции ввиду увеличения плотности энергии на единицу площади, что соответствует выражению (2).

Для исследования влияния параметров лазерного воздействия на шероховатость обработанной области выбраны шесть режимов лазерной обработки, обеспечивающих наилучшее качество поверхности и один наиболее производительный режим (см. таблицу). Первоначальная оценка качества поверхности давалась на основе снимков сечений твердосплавных образцов, полученных с помощью оптического микроскопа.

№	h , мкм	P_o , %	V , мм/с	f , кГц	τ , нс	Число проходов	S_{ax} , мкм	S_{az} , мкм	F_p , Дж/см ²	F_A , Дж/см ²	P_m , Вт
1	33	95	125	50	4	150	1,6	16	1,8	563,2	1,8
2	778	90	50	10	200	50	13	86	40,8	3200	8
3	39	80	200	20	50	50	1,2	10,2	13,7	270	5,4
4	193	90	100	20	50	50	3,9	34,2	13,7	1080	5,4
5	231	90	50	10	50	50	4,4	35,7	13,7	1080	2,7
6	172	80	200	20	30	50	1,6	23,3	9,6	190	3,8
7	22	80	100	10	30	50	1,5	10,9	9,6	180	1,8

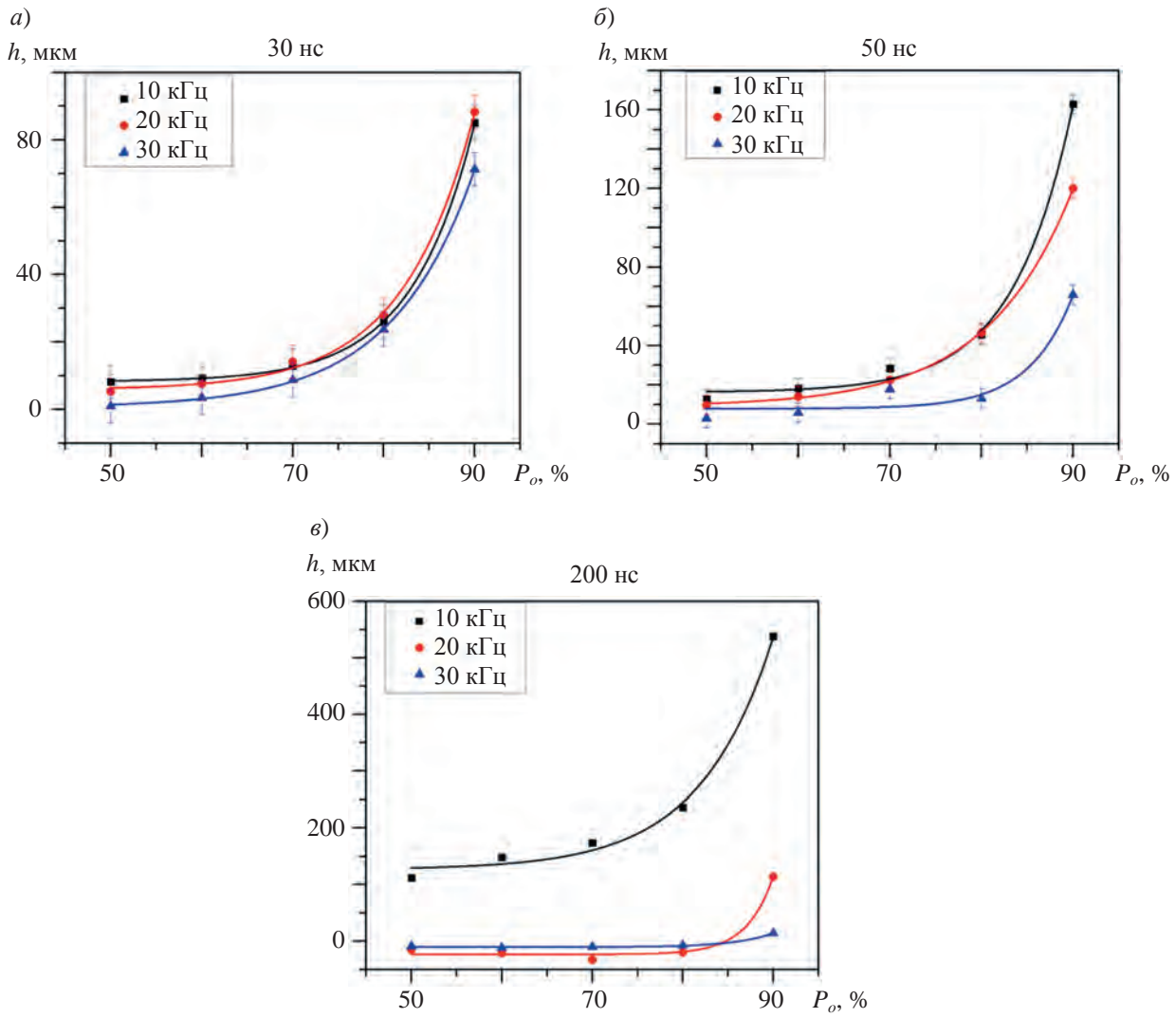


Рис. 6

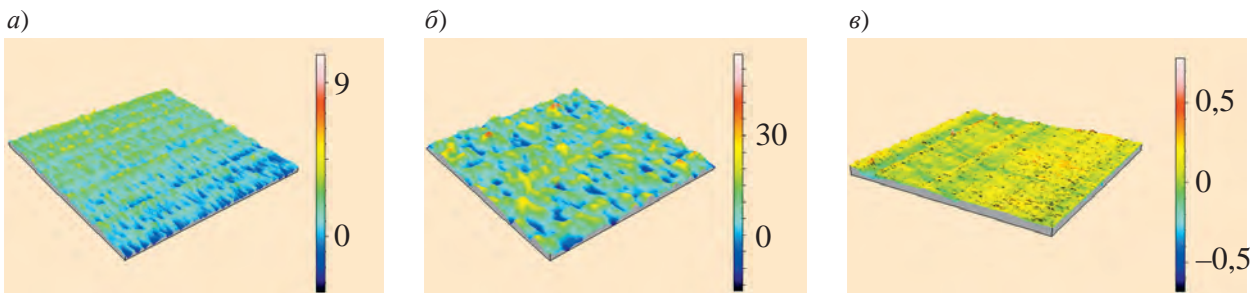


Рис. 7

Трехмерные изображения исследуемого микрорельефа обработанных поверхностей представлены на рис. 7: *а* — режим № 3, обеспечивающий наименьшую шероховатость поверхности; *б* — режим № 2, обеспечивающий наибольшую глубину абляции; *в* — микрорельеф поверхности, обработанной методом шлифовки. На рис. 8 представлены зависимости среднего арифметического значения шероховатости обработанной поверхности от плотности энергии на единицу площади. В ходе измерений шероховатости методом контактной профилометрии использовались две стратегии: первая заключается в перемещении иглы профилометра параллельно направлению лазерного сканирования (*а*), а вторая — в перемещении иглы перпендикулярно (*б*). При увеличении плотности энергии на единицу площади наблюдается явный рост

шероховатости поверхности, что связано с увеличением температуры материала в процессе обработки, образованием жидкой фазы, а также повторным осаждением частиц материала. Аналогичная зависимость наблюдалась при обработке лазером пикосекундной длительности импульсов [14].

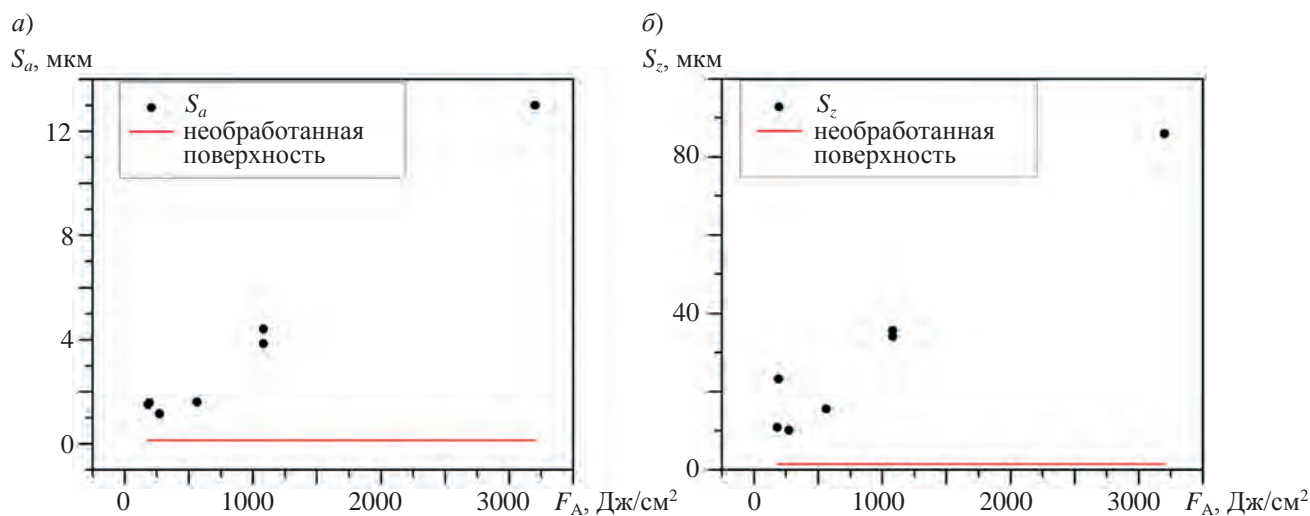


Рис. 8

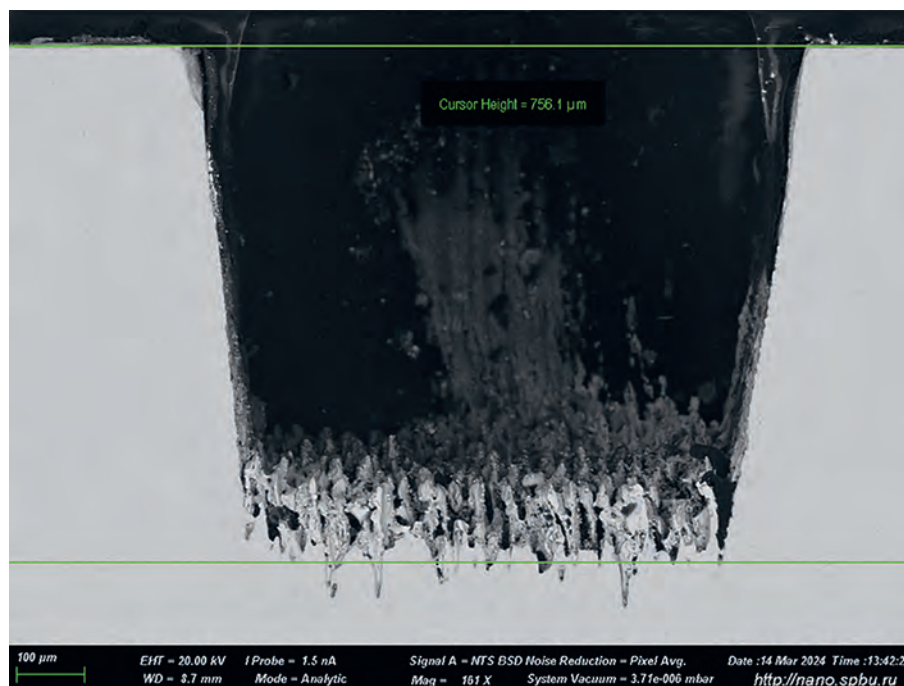


Рис. 9

На рис. 9 представлен полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа профиль области прямоугольной формы, сформированной на поверхности твердосплавной заготовки методом лазерной абляции: видно, что боковые стенки обладают наилучшим качеством поверхности. Анализ снимков профиля, полученного при наиболее производительном режиме лазерной обработки (см. таблицу, режим № 2), демонстрирует, что несмотря на наихудшее качество поверхности дна, шероховатость боковой поверхности остается сравнительно низкой. Результаты контактной профилометрии показали, что среднее арифметическое значение шероховатости сечений боковой поверхности R_a составляет 0,904 мкм, это является наименьшим значением из всех представленных в таблице. Таким образом, можно сделать вывод, что стратегия

тангенциальной обработки, описанная М. Варханеком и др. [1], является оптимальным выбором при обработке заготовок из карбида вольфрама импульсами наносекундной длительности. При этой стратегии формообразование детали достигается за счет изменения геометрии боковой поверхности, которая обладает наименьшей шероховатостью при наибольшей скорости удаления материала. Стоит отметить, что шероховатость боковой стенки сечения увеличивается ближе ко дну. Возможная причина этого явления заключается в повторном осаждении части материала, удаляемого в процессе абляции.

Заключение. Проведено исследование обработки поверхности карбида вольфрама с помощью волоконного лазера с наносекундной длительностью импульсов. Исследование влияния параметров лазерной абляции подчеркнуло важность учета таких факторов, как накопление тепла и реакция материала на повторяющиеся лазерные взаимодействия, а также наличие повторного осаждения частиц материала, в формировании конечного качества поверхности.

Исследования показали, что при многоимпульсном воздействии с постоянной плотностью энергии одного импульса наибольшее увеличение глубины абляции наблюдается при коэффициенте перекрытия 80 % и выше. Увеличение коэффициента перекрытия пятен ведет к росту глубины абляции. Обнаружено, что с увеличением глубины абляции наблюдается ухудшение качества поверхности дна обрабатываемой формы ввиду увеличенного образования жидкой фазы. Тем не менее, значения параметров шероховатости боковой стенки, полученной при наиболее производительном режиме обработки, являются наименьшими, что свидетельствует об актуальности использования тангенциальной стратегии обработки как основного инструмента для обработки заготовок из карбида вольфрама.

В результате проведенных экспериментов установлено, что минимальное значение шероховатости дна обрабатываемой поверхности сплава VHS11 на лазерной установке с наносекундной длительностью импульсов достигается при следующих параметрах: частота следования импульсов 20 кГц, длительность импульсов 50 нс и коэффициент перекрытия 80 %. При этих условиях среднее арифметическое отклонение профиля по площади S_a составило 1,2 мкм. Наибольшая производительность обработки, наблюдается при частоте следования импульсов 10 кГц, длительности импульсов 200 нс и коэффициенте перекрытия 90 %. При этом среднее арифметическое отклонение профиля по площади S_a составляет 13 мкм, а значение шероховатости боковых поверхностей R_a составило 0,9 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Warhanek M., Walter C. W., Hirschi M., Boos J. B., Bucourt J. F., & Wegener K. Comparative analysis of tangentially laser-processed fluted polycrystalline diamond drilling tools // J. of Manufacturing Processes. 2016. Vol. 23. P. 157–164. DOI:10.1016/j.jmapro.2016.06.023.
2. Masuzawa T. State of the Art of Micromachining // CIRP Annals. 2000. Vol. 49, N 2. P. 473–488. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63451-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9).
3. Vishal K. S., Shaik S., Sayantan B. A Comprehensive review of micro-cutting operation – micro milling tools // JETIR. 2021. N 8. P. 212–218.
4. O'Hara J., Fang F. Advances in micro cutting tool design and fabrication // Intern. J. of Extreme Manufacturing. 2019. N 1. P. 1–29.
5. Egashira K., Furukawa T. Microcutting using a micro turn-milling machine // Precision Engineering. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology. 2015. N 44. P. 81–86.
6. Abele E., & Fajara M. Simulation-based twist drill design and geometry optimization // CIRP Annals. 2010. Vol. 59, N 1. P. 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.063>.
7. Aurich J. C., Reichenbach I. G., & Schüler G. M. Manufacture and application of ultra-small micro end mills // CIRP Annals. 2012. Vol. 61, N 1. P. 83–86. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.012>.
8. Zhang Z., Peng H., & Yan J. Micro-cutting characteristics of EDM fabricated high-precision polycrystalline diamond tools // Intern. J. of Machine Tools and Manufacture. 2013. Vol. 65. P. 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.007>.

9. Egashira K., Hosono S., Takemoto S., and Masao Y. Fabrication and cutting performance of cemented tungsten carbide micro-cutting tools // *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35, N 4. P. 547–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.06.002>.
10. Cheng X., Wang Z., Kobayashi S., Nakamoto K., Yamazaki K. Development of a computer assistant programming system for micro/nano milling tool fabrication by multi-axis wire EDM // *Intern. J. Comput. Integr. Manuf.* 2009. N 9. P. 847–856.
11. Timmer J. Laserkonditionieren von CBN- und Diamantschleif-scheiben: Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig, 2001.
12. Walter C., Rabiye M., Warhanek M., Jochum N., & Wegener K. Dressing and truing of hybrid bonded CBN grinding tools using a short-pulsed fibre laser // *CIRP Annals*. 2012. Vol. 61, N 1. P. 279–282. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.001>.
13. Tan J. L., Butler D. L., Sim L. M., and Jarfors A. E. W. Effects of laser ablation on cemented tungsten carbide surface quality // *Applied Physics A*. 2010. Vol. 101, N 2. P. 265–269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5815-9>.
14. Marimuthu S., Dunleavy J., and Smith B. Picosecond laser machining of tungsten carbide // *Intern. J. of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020. Vol. 92. P. 105338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105338>.
15. Leitz K.-H., Redlingshöfer B., Reg Y., Otto A., & Schmidt M. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses // *Physics Procedia*. 2011. Vol. 12. P. 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.128>.
16. Eberle G., Dolt C. Ultrashort-pulsed laser processing of hard and ultrahard helical cutting tools // 10th CIRP Conf. on Photonic Technologies [LANE 2018], Sep. 2018.
17. Hajri M., Pfaff J., Büttner H., Voegtlin M., Kaufmann R., and Wegener K. Fabrication of a ball end nose micro milling tool by tangential laser ablation // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 77. P. 654–657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.184>.
18. Denkena B., Krödel A., & Grove T. On the pulsed laser ablation of polycrystalline cubic boron nitride—Influence of pulse duration and material properties on ablation characteristics // *J. of Laser Applications*. 2019. Vol. 31, N 2. P. 022004. <https://doi.org/10.2351/1.5084724>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Александр Владимирович Гуторов | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: gut-111@mail.ru |
| Илья Константинович Чайка | — студент; Университет ИТМО, Институт лазерных технологий; E-mail: chaika00753@yandex.ru |
| Язан Алсаиф | — аспирант; Университет ИТМО, Институт лазерных технологий; E-mail: gut-111@mail.ru |
| Галина Викторовна Романова | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, Институт лазерных технологий; директор; E-mail: gvromanova@itmo.ru |
| Андрей Анатольевич Петров | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, Институт лазерных технологий; доцент; E-mail: aapetrov@itmo.ru |
| Максим Яковлевич Афанасьев | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: myafanasyev@itmo.ru |

Поступила в редакцию 15.10.24; одобрена после рецензирования 03.02.25; принята к публикации 25.04.25.

REFERENCES

1. Warhanek M., Walter C.W., Hirschi M., Boos J.B., Bucourt J.F., & Wegener K. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 23, pp. 157–164. DOI: [10.1016/j.jmapro.2016.06.023](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.023).
2. Masuzawa T. *CIRP Annals*, 2000, no. 2(49), pp. 473–488, [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63451-9](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63451-9).
3. Vishal K.S., Shaik S., Sayantan B. et al. *JETIR*, 2021, no. 8, pp. 212–218.
4. O'Hara J., Fang F. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, no. 1, pp. 1–29.
5. Egashira K., Furukawa T. *Precision Engineering – Journal of The International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2015, no. 44, pp. 81–86.
6. Abele E., & Fajara M. *CIRP Annals*, 2010, no. 1(59), pp. 145–150, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.063>.
7. Aurich J.C., Reichenbach I.G., & Schüller G.M. *CIRP Annals*, 2012, no. 1(61), pp. 83–86, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.012>.
8. Zhang Z., Peng H., & Yan J. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 65, pp. 99–106, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2012.10.007>.

9. Egashira K., Hosono S., Takemoto S., and Masao Y. *Precision Engineering*, 2011, no. 4(35), pp. 547–553, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.06.002>.
10. Cheng X., Wang Z., Kobayashi S., Nakamoto K., Yamazaki K. *Intern. J. Comput. Integr. Manuf.*, 2009, no. 9, pp. 847–856.
11. Timmer J. *Laserkonditionieren von CBN- und Diamantschleif-scheiben*, Doctor's thesis, Technische Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig, 2001.
12. Walter C., Rabiey M., Warhanek M., Jochum N., & Wegener K. *CIRP Annals*, 2012, no. 1(61), pp. 279–282, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.001>.
13. Tan J.L., Butler D.L., Sim L.M., and Jarfors A.E.W. *Applied Physics A*, 2010, no. 2(101), pp. 265–269, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5815-9>.
14. Marimuthu S., Dunleavy J., and Smith B. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, vol. 92, pp. 105338, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105338>.
15. Leitz K.-H., Redlingshöfer B., Reg Y., Otto A., & Schmidt M. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 230–238, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.128>.
16. Eberle G., Dolt C. *10th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2018]*, Sep. 2018.
17. Hajri M., Pfaff J., Büttner H., Voegtlin M., Kaufmann R., and Wegener K. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 654–657, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.184>.
18. Denkena B., Krödel A., & Grove T. *Journal of Laser Applications*, 2019, no. 2(31), pp. 022004, <https://doi.org/10.2351/1.5084724>.

DATA ON AUTHORS

Aleksandr V. Gutorov	— PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: gut-111@mail.ru
Ilya K. Chaika	— Student; ITMO University, Institute of Laser Technologies; E-mail: chaika00753@yandex.ru
Yazan Alsaif	— Post-Graduate Student; ITMO University, Institute of Laser Technologies; E-mail: gut-111@mail.ru
Galina V. Romanova	— PhD; ITMO University, Institute of Laser Technologies; Director of the Institute; E-mail: gromanova@itmo.ru
Andrey A. Petrov	— PhD, Associate Professor; ITMO University, Institute of Laser Technologies; E-mail: aapetrov@itmo.ru
Maxim Ya. Afanasyev	— PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: myafanasyev@itmo.ru

Received 15.10.24; approved after reviewing 03.02.25; accepted for publication 25.04.25.