

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.91

doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-34-41

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ИМПЛАНТОВ ИЗ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО И КРУПНОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА

Анастасия Вячеславовна Хабарова^{1✉}, Михаил Владимирович Песин², Владимир Фёдорович Макаров³, Луиза Викторовна Коногорова⁴

^{1,2,3,4} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

¹ habarovanastya98@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6114-478X>

² pesin@pstu.ru

³ makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

⁴ konogorova98@mail.ru

Аннотация

В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям ультрамелкозернистых (УМЗ) титановых материалов, получаемых методами интенсивной пластической деформации. Такие технологии позволяют сформировать субмикронную структуру и тем самым изменить комплекс механических и физических свойств, определяющих поведение материала при изготовлении деталей. В настоящей работе выполнено сравнительное исследование обрабатываемости резанием титана Grade 4 в двух структурных состояниях – ультрамелкозернистом (УМЗ) и крупнозернистом (КЗ). Рассмотрено влияние режимов токарной обработки на параметры шероховатости поверхности как на один из основных показателей качества обработанного слоя. Экспериментальные данные показывают, что УМЗ состояние в большинстве случаев обеспечивает более низкие значения Ra по сравнению с КЗ

состоянием. Различия особенно проявляются при повышенной скорости резания, когда процесс становится более устойчивым, а качество поверхности — более воспроизводимым. Минимальное значение шероховатости (Ra) $0,29 \pm 0,03$ мкм получено для УМЗ титана при скорости резания (V) 27 м/мин, подачи (S) 0,06 мм/об и глубине резания (t) 0,3 мм. Полученные результаты указывают на возможность повышения производительности точения при сохранении требований к качеству поверхности. Это важно при изготовлении ответственных деталей, в том числе заготовок медицинских имплантатов, где стабильность параметров поверхностного слоя напрямую влияет на эксплуатационные характеристики изделия.

Ключевые слова: титан, ультрамелкозернистые материалы, обработка, резание, шероховатость, поверхность, механообработка, импланты.

Ссылка для цитирования:

Хабарова А.В. Оценка влияния режимов механической обработки на шероховатость поверхности имплантов из ультрамелкозернистого и крупнозернистого титана / А.В. Хабарова, М.В. Песин, В.Ф. Макаров, Л.В. Коногорова // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 6. – С. 34-41. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-34-41.

Original article

Open Access Article

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF MACHINING MODES ON THE SURFACE ROUGHNESS OF IMPLANTS MADE OF ULTRAFINE-GRAIN AND COARSE-GRAIN TITANIUM

Anastasia Vyacheslavovna Khabarova^{1✉}, Mikhail Vladimirovich Pesin², Vladimir Fedorovich Makarov³, Louisa Viktorovna Konogorova⁴

^{1,2,3,4} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

¹ habarovanastya98@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6114-478X>

² pesin@pstu.ru

³ makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

⁴ konogorova98@mail.ru

Abstract

Currently, special attention is being paid to the research of ultrafine-grain (UFG) titanium materials obtained by methods of intensive plastic deformation. These technologies make it possible to form a submicron structure and thereby change the complex of mechanical and physical properties that determine the behavior of the material in the manufacture of parts. In this paper, a comparative study of the machinability of Grade 4 titanium in two structural states, ultrafine-grain (UFG) and coarse-grain (CG), is performed. The influence of turning modes on the surface roughness parameters is considered as one of the main indicators of the quality of the treated layer. Experimental data show that UFG state in most cases provides lower values of Ra compared to CG state. The differences are

especially evident with increased cutting speed, when the process becomes more stable and the surface quality is more reproducible. The minimum roughness value (Ra) of 0.29 ± 0.03 microns is obtained for UFG titanium at a cutting speed (V) of 27 m/min, feed (S) of 0.06 mm/rpm and a cutting depth (t) of 0.3 mm. The obtained results indicate the possibility of increasing turning productivity while maintaining surface quality requirements. This is important in the manufacture of critical parts, including medical implant blanks, where the stability of the surface layer parameters directly affects the operational characteristics of the product.

Keywords: titanium, ultrafine-grain materials, cutting, roughness, surface, machining, implants.

Reference for citing:

Khabarova AV, Pesin MV, Makarov VF, Konogorova LV. Assessment of the influence of machining modes on the surface roughness of implants made of ultrafine-grain and coarse-grain titanium. Transport Engineering. 2026;6:34-41. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-34-41.

Введение

Титан и его сплавы широко используются при производстве медицинских имплантатов благодаря их высокой биосовместимости и коррозионной стойкости. Однако обработка титана требует значительных усилий и затрат из-за его уникальных свойств. Низкая обрабатываемость титановых сплавов резанием обусловлена их низкой пластичностью, которая характеризуется высоким коэффициентом упрочнения во время процесса резания, примерно вдвое превышающим аналогичный показатель жаропрочных сталей и сплавов [1]. Кроме того, высокая химическая активность титановых сплавов к кислороду, азоту и водороду вызывает интенсивное охрупчивание поверхностного слоя сплавов из-за диффузии атомов газов в него при повышении температуры во время резания [2]. Это приводит к росту сил резания, напряжений и температуры резания, что усиливает износ инструмента и ухудшает качество поверхности после обработки. В литературе отмечается, что низкая теплопроводность титана приводит к концентрации тепла у режущей кромки и снижению стойкости инструмента [3]. Кроме того, высокая химическая реактивность способствует адгезии материала заготовки к инструменту [4].

Низкая теплопроводность титана также способствует концентрации тепла на режущей кромке инструмента, что сокра-

щает срок его службы и приводит к налипанию, задирам и ухудшению шероховатости обработанной поверхности [5]. Отмечается, что высокие температуры в зоне резания в сочетании с низкой теплопроводностью титана усиливают локальную адгезию и износ, что требует рационального выбора режимов резания [6].

В последние годы значительное внимание уделяется исследованию ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов, полученных методами интенсивной пластической деформации. Эти методы позволяют значительно измельчить зерна до субмикронного уровня, что изменяет механические и физические свойства материалов [7]. Однако возникает вопрос о влиянии высокой твердости и прочности этих новых титановых сплавов на их обрабатываемость резанием.

Качество поверхностного слоя существенно зависит от параметров обработки, а оптимизация условий резания играет ключевую роль в обеспечении эксплуатационных характеристик деталей, особенно при работе с труднообрабатываемыми материалами, такими как титан [8]. В условиях медицинского применения данные требования приобретают нормативно закреплённый характер, поскольку для большинства типов имплантатов из титана и титановых сплавов, используемых в клинической практике, регламентируются пре-

дельные значения параметров качества поверхности.

В работах по поверхности зубных имплантов отмечают простую закономерность: чем выше Ra поверхности, тем легче на ней удерживаются бактерии. При этом в ряде исследований предлагается ориентир порядка 0,3 мкм: если сделать поверхность ещё более гладкой, заметного дополнительного эффекта по адгезии обычно уже не наблюдают. При этом не-

Материал и методика проведения исследования

В рамках исследования использовали заготовки для зубных имплантов в виде прутков из технически чистого титана марки *Grade 4* (состав, мас. %: Fe – 0,5, O – 0,4, C – 0,08, N – 0,05, H₂ – 0,015, Ti – основа) диаметром 5 мм, произведённые на предприятии ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» в городе Верхняя Салда. Выбор данного диаметра обусловлен его распространённым применением в качестве заготовки для производства зубных имплантов, что повышает практическую значимость исследования.

Для получения прутков с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ) применяли метод равноканального углового прессования по схеме Конформ (РКУП-К) (рис. 1) с последующим волочением [10].



Рис. 1. РКУП по схеме Конформ

Fig. 1. Equal-channel angular pressing according to Conform method

допустимыми считаются напавы, задиры и микротрещины поверхностного слоя, являющиеся концентраторами напряжений и способные привести к снижению усталостной долговечности и надёжности имплантата [9]. Для биомедицинских изделий качество поверхности (Ra) напрямую связано с биосовместимостью; поэтому в технологическом процессе обработки имплантатов обычно стремятся к стабильному получению низкой шероховатости [4].

В результате сформировали структуру со средним размером зерна α -фазы $0,15 \pm 0,03$ мкм и микротвердостью 325 ± 11 HV. Крупнозернистую (КЗ) структуру получали путём рекристаллизационного отжига образцов при температуре 600 °С с выдержкой в печи в течение 30 минут и охлаждением на воздухе, что обеспечило средний размер зерна 10 мкм и микротвердость 274 ± 10 HV.

Токарную обработку проводили на токарно-винторезном станке *JET GH-1640 ZX* (рис. 2) с максимальной мощностью шпинделя 2,2 кВт, диапазоном частоты вращения шпинделя 100–1800 об/мин и расстоянием между центрами 1000 мм.

В качестве режущего инструмента выбрали двустороннюю пластину *CNMG 160608-46*, произведённую фирмой *Sandvik*. Пластина изготовлена из твердосплавного материала на основе карбида вольфрама (WC) с добавлением кобальта (Co), с углом в плане 80° и радиусом при вершине 0,8 мм, без задних углов для чистовой и получистовой обработки. Данная пластина позволяет обеспечить все требования к обработке данного материала. Характеристики пластины приведены на рис. 3. Сравнительные испытания показывают, что многослойные покрытия (например, TiN+TiCN) могут обеспечивать большую стойкость инструмента по сравнению с непокрытыми и отдельными PVD-покрытиями, при этом ключевую роль играет низкий коэффициент трения [6].



Рис. 2. Общий вид токарно-винторезного станка JET GH-1640 ZX
 Fig. 2. General view of JET GH-1640 ZX turning machine

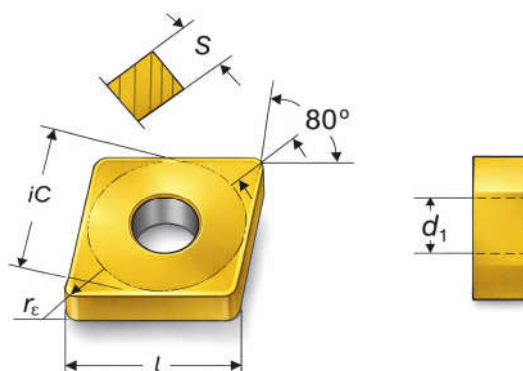


Рис. 3. Пластина CNMG 160608-46, где $iC = 15,87$ мм,
 $s = 6,35$ мм, $d1 = 6,35$ мм, $r = 0,8$ мм
 Fig. 3. Plate CNMG 160608-46, where $iC = 15.87$ mm,
 $s = 6.35$ mm, $d1 = 6.35$ mm, $r = 0.8$ mm

Использование одной и той же геометрии сменной твердосплавной пластины во всех сериях экспериментов обеспечило воспроизводимость условий резания и сопоставимость результатов для УМЗ и КЗ состояний. В ходе работы сохранялась одинаковая схема установки инструмента в державке, что исключало влияние геометрических факторов на формирование

поверхностного слоя. Поэтому различия в шероховатости обработанной поверхности в рамках настоящего исследования можно связывать преимущественно с варьированием скорости резания, подачи и глубины резания, а также с особенностями микроструктуры материала (УМЗ/КЗ), влияющими на процесс стружкообразования и характер взаимодействия в зоне резания.

Планирование и проведение эксперимента

Для исследования влияния режимов резания на шероховатость поверхности использовали метод планирования многофакторного эксперимента 2^3 . В качестве варьируемых факторов выбрали: скорость резания (V), подачу (S) и глубину резания (t). Уровни факторов и интервалы варьи-

рования установили на основе анализа рекомендаций каталогов производителей инструмента, они представлены в табл. 1.

На основе данного плана сформирована матрица эксперимента, состоящая из 8 опытов (режимов) с трёхкратным повторением. Выбор рациональных режимов

резания для образцов из сплава *Grade 4* с крупным и ультрамелкозернистым зерном проводился с учётом информации, полученной из литературных источников, рекомендаций каталогов производителей инструментов и возможностей используемо-

го оборудования. Измерения шероховатости R_a проводили на профилограф-профилометре *MARSURF PSI 9* (рис. 4) в соответствии со стандартами ISO 4287, ГОСТ 2789.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов эксперимента

Table 1

Levels and intervals of varying experimental factors

Фактор	Обозначение	Основной уровень	Интервал варьирования	Нижний уровень (-1)	Верхний уровень (+1)
Скорость резания, м/мин	V	18,5	8,5	10	27
Подача, мм/об	S	0,145	0,085	0,06	0,23
Глубина резания, мм	t	0,175	0,125	0,05	0,3



Рис. 4. Профилометр *MARSURF PSI*

Fig. 4. *MARSURF PSI* profilometer

Результаты проведенных экспериментальных исследований, включающие замер параметров шероховатости обработанных поверхностей с последующей статистической обработкой полученных данных для исключения случайных погрешностей измерений и определения достоверных значений исследуемых характеристик, приведены в сводной табл. 2, где представлены усредненные показатели шероховатости для всех изученных комбинаций режимов резания и типов микроструктуры материала.

Таблица 2

Режимы резания и результаты измерения шероховатости поверхности R_a

Table 2

Cutting modes and measurement results of surface roughness R_a

№ режима	Режимы резания			УМЗ	КЗ
	V , м/мин	S , мм/об.	t , мм	R_a , мкм	R_a , мкм
1	10	0.06	0.05	0,772±0,053	0,414±0,043
2	10	0.06	0.3	1,161±0,245	0,321±0,051
3	10	0.23	0.05	2,019±0,108	1,938±0,092
4	10	0.23	0.3	1,753±0,050	1,641±0,061
5	27	0.06	0.05	0,569±0,068	0,469±0,067
6	27	0.06	0.3	0,291±0,027	0,643±0,172
7	27	0.23	0.05	1,430±0,198	1,678±0,098
8	27	0.23	0.3	1,538±0,075	1,877±0,029

Для статистической обработки результатов и построения математической модели использовали метод наименьших квадратов. Проверку адекватности модели, значимость коэффициентов регрессии и однородность дисперсий проводили с использованием критериев Фишера (F-

критерий), Стьюдента (t -критерий) и Кохрена соответственно.

На основе экспериментальных данных построены регрессионные математические модели для 2 типов структуры с разным размером зерна. Для крупнозернистой структуры:

$$Ra = -4,218 + 0,103V + 27,119S + 8,403t - 0,610VS - 0,191Vt - 57,918St \quad (1)$$

Для УМЗ структуры:

$$Ra = 0,014 - 0,004V + 1,252S + 2,114t + 0,123VS - 0,021Vt - 6,740St \quad (2)$$

Обсуждение результатов

Анализ данных табл. 2 показывает различный отклик УМЗ и КЗ титана на изменение параметров резания. При скорости резания 10 м/мин увеличение глубины резания с 0,05 до 0,3 мм при малой подаче (0,06 мм/об) приводит к росту Ra для УМЗ титана с 0,77 до 1,16 мкм, в то время как для КЗ титана этот параметр остаётся на стабильном уровне 0,32–0,41 мкм (режимы 1 и 2). Увеличение подачи до 0,23 мм/об резко ухудшает качество поверхности для обоих состояний, увеличивая Ra до значений 1,5–2,0 мкм (режимы 3, 4, 7, 8).

Наиболее значимые результаты получены при повышенной скорости резания

27 м/мин. Для УМЗ титана увеличение глубины резания с 0,05 до 0,3 мм при малой подаче (режимы 5 и 6) приводит не к ухудшению, а к улучшению качества поверхности: Ra снижается с 0,57 до 0,29 мкм. В то же время для КЗ титана при тех же условиях наблюдают рост Ra с 0,47 до 0,64 мкм. Таким образом, минимальная шероховатость $0,29 \pm 0,03$ мкм для УМЗ титана достигнута при режиме №6 (V 27 м/мин, S 0,06 мм/об, t 0,3 мм). Для КЗ титана наилучший результат ($Ra = 0,32 \pm 0,05$ мкм) получен при значительно меньшей скорости резания 10 м/мин (режим 2) (рис. 5).

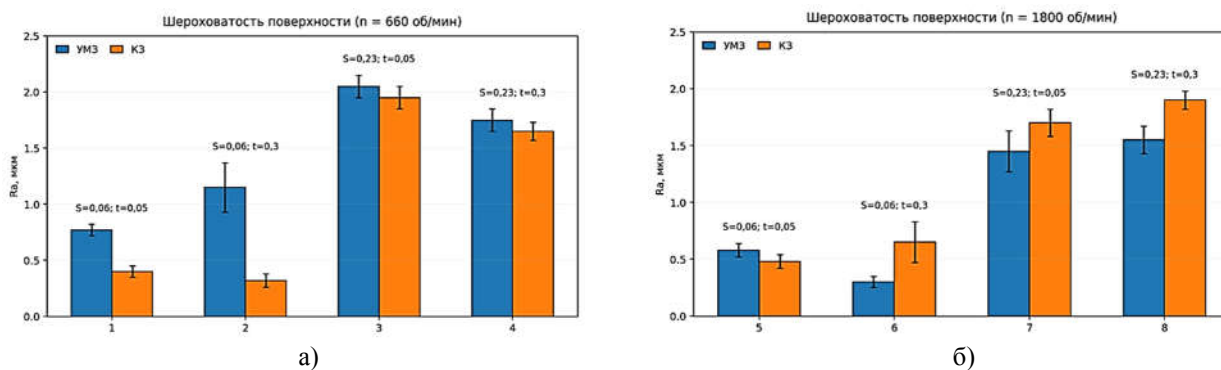


Рис. 5. Шероховатость поверхности УМЗ и КЗ титана *Grade 4* в зависимости от режимов обработки со скоростями резания 10 м/мин – а; б – 27 м/мин

Fig. 5. Surface roughness of *Grade 4* UFG and CG titanium depending on machining modes with cutting speeds of 10 m/min – a; b – 27 m/min

Выводы

Экспериментально установлено, что ультрамелкозернистый титан *Grade 4* демонстрирует лучшую обрабатываемость резанием по сравнению с его крупнозернистым аналогом. Преимущество УМЗ титана наиболее выражено при использовании повышенных скоростей резания.

Наименьшая шероховатость поверхности $0,29 \pm 0,03$ мкм для УМЗ титана достигнута при скорости резания 27 м/мин, подаче 0,06 мм/об и глубине резания 0,3 мм. Для получения сопоставимого качества поверхности (Ra 0,32 мкм) КЗ титана требуется снижение скорости резания до 10 м/мин.

Установленный факт улучшения обрабатываемости УМЗ титана при высоких скоростях резания является технологически выгодным, так как позволяет повысить производительность механической обработки примерно в 1,5 раза без ущерба для качества поверхности. Основной причиной улучшения обрабатываемости считают переход к более однородному механизму

Заключение

Таким образом, результаты настоящего исследования особенностей обрабатываемости сплава *Grade 4* с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой, позволяют сделать следующие выводы: (*Grade 4*) (с)

1. Новые титановые сплавы с УМЗ структурой при токарной обработке демонстрируют лучшую обрабатываемость резанием по сравнению с крупнозернистыми аналогами.

2. Наименьшая шероховатость ($Ra_{0,29\pm 0,03}$) достигнута для сплава с УМЗ структурой при более высокой скорости 27 м/мин, чем при обработке КЗ заготовки при скорости 10 м/мин, что является благоприятным фактором для повышения

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ezugwu, E. O., Bonney, J., & Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(1), 233-253.
2. Che-Haron, C. H. (2001). Machining of titanium alloys: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 25-34.
3. Lapovok, R., Molotnikov, A., Levin, Y., Bandaranayake, A., & Estrin, Y. (2012). Machining of coarse grained and ultra fine grained titanium. *Journal of Materials Science*, 47(11), 4589-4594.
4. Telles F., Amorim H.J., Souza A.J. Comparative assessment of lubri-cooling conditions when turning CP-Ti Grade 4 based on surface roughness // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 113. P. 365–378. DOI: 10.1007/s00170-021-06672-9.
5. Sun, S., Brandt, M., & Dargusch, M. S. (2009). Machining titanium and its alloys -A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(12-13), 3787-3798.

REFERENCES

1. Ezugwu EO, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of*

пластического течения в зоне резания, обусловленному структурой УМЗ материала, что снижает динамические нагрузки и вибрации.

Полученные результаты имеют практическую значимость для рационализации процессов механической обработки перспективных УМЗ титановых сплавов, применяемых в медицинской отрасли.

производительности механообработки в 1,5 раза, при обеспечении требований по качеству обработки

3. Рекомендуемые режимы резания при полуставном точении титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой, следующие: скорость резания 27 м/мин, подача 0,06 мм/об, глубина резания 0,3 мм. (В данном исследовании рассматривался технически чистый титан *Grade 4*; рекомендация относится к нему.)

Эти выводы подчеркивают важность дальнейших исследований в области обработки ультрамелкозернистых титановых сплавов для рационализации процессов механической обработки и повышения их эффективности.

6. Lemes C.V., Diniz A.E., Saciotto V.R. Comparing the performance of several tool coatings in turning of commercially pure titanium grade 4 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 123. P. 1733–1743. DOI: 10.1007/s00170-022-10318-9.
7. Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., & Alexandrov, I. V. (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 45(5), 103-189.
8. Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., & M'Saoubi, R. (2011). Surface integrity in machining: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2), 603-626.
9. Geetha M., Singh A. K., Asokamani R., Gogia A. K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review // *Progress in Materials Science*. 2009. Vol. 54. P. 397-425.
10. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V. Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Академкнига, 2019. 398 с.

Materials Processing Technology. 2003;134(1):233-253.

2. Che-Haron CH. Machining of titanium alloys: review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;113(1-3):25-34.
3. Lapovok R, Molotnikov A, Levin Y, Bandaranayake A, Estrin Y. Machining of coarse grained and ultra fine grained titanium. *Journal of Materials Science*. 2012;47(11):4589-4594.
4. Telles F, Amorim HJ, Souza AJ. Comparative assessment of lubri-cooling conditions when turning CP-Ti Grade 4 based on surface roughness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;113:365–378. DOI: 10.1007/s00170-021-06672-9.
5. Sun S, Brandt M, Dargusch MS. Machining titanium and its alloys: review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(12-13):3787-3798.
6. Lemes CV, Diniz AE, Saciotto VR. Comparing the performance of several tool coatings in turning of commercially pure titanium grade 4. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;123:1733–1743. DOI: 10.1007/s00170-022-10318-9.
7. Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. 2000;45(5):103-189.
8. Jawahir IS, Brinksmeier E, M'Saoubi R. Surface integrity in machining: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011;60(2):603-626.
9. Geetha M, Singh AK, Asokamani R, Gogia AK. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: review. *Progress in Materials Science*. 2009;54:397-425.
10. Valiev RZ, Alexandrov IV. Bulk nanostructured metallic materials. Moscow: Akademkniga; 2019.

Информация об авторах:

Хабарова Анастасия Вячеславовна – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Песин Михаил Владимирович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения», декан «Механико-технологического факультета», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел. +7-912-485-55-05.

Khabarova Anastasia Vyacheslavovna – Postgraduate Student at the Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University.

Pesin Mikhail Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Innovative Engineering Technologies, Dean of the Faculty of Mechanics and Technology, Perm National Research Polytechnic University; phone: +7-912-485-55-05.

Макаров Владимир Фёдорович – доктор технических наук, профессор, зам. заведующего кафедрой «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел. +7 (342) 2-198-236.

Коногорова Луиза Викторовна – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, тел. +7 (912) 987-11-14.

Makarov Vladimir Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; phone: +7 (342) 2-198-236.

Konogorova Luisa Viktorovna – Assistant Professor of the Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; phone: +7 (912) 987-11-14.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 25.02.2026; одобрена после рецензирования 05.05.2026; принята к публикации 27.05.2026. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 25.02.2026; approved after review on 05.05.2026; accepted for publication on 27.05.2026. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.