Транспортное машиностроение. 2026. № 9(57). С. 4-14. ISSN 2782-5957 (print)
Transport Engineering. 2026. no. 9(57). P. 4-14. ISSN 2782-5957 (print)

Машиностроение
Mechanical engineering

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.91
doi: 10.30987/2782-5957-2026-9-4-14

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РЕЗАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С КРУПНОЗЕРНИСТОЙ И СПЛАВА С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Луиза Викторовна Коногорова[1], Михаил Владимирович Песин[2]✉, Владимир Федорович Макаров[3], Анастасия Вячеславовна Хабарова[4]
[1,2,3,4] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
[1] konogorova98@mail.ru; https://orcid.org/0009-0008-5371-9269
[2] pesin@pstu.ru; https://orcid.org/0000-0003-0194-5965
[3] makarovv@pstu.ru; https://orcid.org/0000-0002-0383-0208
[4] habarovanastya98@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0006-6114-478X

Аннотация

Целью работы является технологическое обеспечение и повышение качества поверхности деталей из высокопрочного ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 при фрезеровании на основе выбора рациональных режимов резания. Исследуется задача установления закономерностей влияния скорости резания, подачи и глубины на составляющие силы резания и шероховатость поверхности для обоснования возможности повышения производительности обработки при сохранении структурной стабильности материала.

Проведено сравнительное исследование обрабатываемости резанием (методом фрезерования) образцов титанового сплава ВТ6 в крупнозернистом (КЗ) и образцов в ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях микроструктуры материала. Рассмотрено влияние режимов фрезерования на параметры шероховатости поверхности *Ra* и составляющую силы резания P_z как на основные показатели качества и стабильности процесса механической обработки.

Экспериментально установлено, что использование материала ВТ6 в УМЗ-состоянии обеспечивает снижение шероховатости поверхности (с 2,65 мкм до 0,46 мкм) при повышенной скорости и подачи при фрезеровании по сравнению с ВТ6 со структурой КЗ при идентичных режимах. Выявлен эффект снижения составляющей силы резания P_z , что объясняется более ранним образованием сдвиговых явлений и экстремальной локализацией деформации в узких зонах сдвига.

Определены рациональные технологические параметры фрезерования УМЗ-сплава ВТ6 (скорость резания в м/мин, подача в мм/зуб), обеспечивающие достижение параметров чистовой обработки и сохранение структурной стабильности поверхностного слоя с глубиной деформации не более 3 мкм. Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности повышения минутной подачи фрезы в 7,6 раза, что ведет к сокращению основного технологического времени обработки при гарантированном качестве обработанной поверхности изделий авиационного и медицинского назначения.

Ключевые слова: сплав, материалы, фрезерование, шероховатость, поверхность, силы резания, прессование.

Ссылка для цитирования:
Коногорова Л.В. Сравнительный анализ силовых параметров и качества поверхности при резании титанового сплава с крупнозернистой и сплава с ультрамелкозернистой структурой /Л.В. Коногорова, М.В. Песин, В.Ф. Макаров, А.В. Хабарова // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 9. – С. 4-14. doi: 10.30987/2782-5957-2026-9-4-14.

Original article
Open Access Article

© Коногорова Л. В., Песин М. В., Макаров В. Ф., Хабарова А. В., 2026

COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER PARAMETERS AND SURFACE QUALITY WHEN CUTTING COARSE-GRAINED AND ULTRA-FINE-GRAINED TITANIUM ALLOYS

Luiza Viktorovna Konogorova[1], Mikhail Vladimirovich Pesin[2]✉, Vladimir Fedorovich Makarov[3], Anastasia Vyacheslavovna Khabarova[4]

[1,2,3,4] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

[1] konogorova98@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-5371-9269

[2] pesin@pstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-0194-5965

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

[4] habarovanastya98@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0006-6114-478X

Abstract

The study objective is to provide technological support and improve the surface quality of parts made of high-strength ultra-fine-grained titanium alloy VT6 during milling, based on the selection of rational cutting modes. The problem is to establish the patterns of influence of cutting speed, feed, and depth on the components of the cutting force and surface roughness in order to substantiate the possibility of increasing treatment productivity while maintaining the structural stability of the material.

A comparative study is conducted of the machinability (using the milling method) of samples of titanium alloy VT6 in a coarse-grained (CG) state and samples in an ultrafine-grained (UFG) state. The influence of milling modes on the surface roughness parameters *Ra* and the cutting force component P_z as key indicators of the quality and stability of the mechanical machining are examined.

It is found out experimentally that using VT6 material in UFG state ensures a reduction in surface roughness (from 2.65 μm to 0.46 μm) at increased speed and feed during milling compared to VT6 with CG structure under identical conditions. An effect of reducing the cutting force component P_z is identified, which is explained by the earlier formation of shear and extreme localization of deformation in narrow shear zones.

Rational technological parameters for milling UFG-alloy VT6 are determined (cutting speed in m/min, feed in mm/tooth), ensuring the achievement of finishing machining parameters and maintaining the structural stability of the surface layer with a deformation depth of no more than 1 μm. The practical significance of the work is in substantiating the possibility of increasing the milling cutter's minute feed by 7.6 times, which leads to a reduction in the main technological treatment time while ensuring the guaranteed quality of the machined surface of aircraft and medical products.

Keywords: alloy, materials, milling, roughness, surface, cutting forces, pressing.

Reference for citing:

Konogorova LV, Pesin MV, Makarov VF, Khabarova AV. Comparative analysis of power parameters and surface quality when cutting coarse-grained and ultra-fine-grained titanium alloys. Transport Engineering. 2026;9:4–14. doi: 10.30987/2782-5957-2026-9-4-14.

Введение

Развитие современного авиационного и ракетно-космического комплекса диктует потребность в металлических материалах, обладающих экстремально высокими удельными характеристиками, такими как прочность, износостойкость и сопротивление усталостному разрушению. В этом контексте двухфазный титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V) занимает доминирующее положение, являясь основным конструкционным материалом для наиболее ответственных и высоконагруженных узлов, таких как лопатки вентилятора, диски и детали компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД). Доля титановых сплавов в массе современных авиадвигателей превышает 30 %, что обусловлено их способностью обеспечивать надежную работу в условиях сочетания высоких механических нагрузок и термического воздействия.

Несмотря на уникальные эксплуатационные свойства, титановые сплавы относятся к группе труднообрабатываемых материалов. Их механическая обработка характеризуется наличием «теплофизического барьера», обусловленного крайне низкой теплопроводностью (в 4-5 раз ниже, чем у конструкционных сталей), высокой адгезионной активностью и склонностью к интенсивному налипанию на режущий инструмент. Эти факторы приводят к концентрации теплоты в зоне контакта,

ускоренному износу инструмента и нестабильному качеству поверхностного слоя, что критично для деталей авиационной техники, где рост шероховатости может существенно снизить предел выносливости на 25 %.

Перспективным направлением повышения прочностных характеристик титанового сплава ВТ6 является формирование в нем ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности – равноканальным угловым прессованием (РКУП). Повышение прочности титановых сплавов обеспечивает их конкурентоспособность, а также способность ответственных деталей обеспечивать повышение характеристик авиационной и космической техники [1–3]. Измельчение зерна до субмикронного уровня (0,1…0,5 мкм) обеспечивает рост предела прочности до 1300…1400 МПа, что на 20 % превышает показатели стандартного крупнозернистого (КЗ) титанового сплава ВТ6. Однако переход к УМЗ состоянию радикально меняет поведение материала при резании и создает риски температурной деградации метастабильной структуры в процессе обработки.

На сегодняшний день в практике машиностроения наблюдается дефицит систематизированных данных и математических моделей, связывающих режимы фрезерования с параметрами качества поверхности для УМЗ состояний сплава ВТ6. Существующие технологические регламенты разработаны исключительно для крупнозернистых структур, что не позволяет в полной мере реализовать потенциал высокопрочных материалов при изготовлении деталей аэрокосмического назначения [4–5].

Материал и методика проведения исследования

Объектом исследования являлся высокопрочный титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V), представленный в двух структурных состояниях: исходном крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ). УМЗ-структура (размер зерна от 20 нм до 200 нм) получена методом интенсивной пластической деформации – равноканальным угловым прессованием (РКУП), что обеспечило повышение предела прочности материала до 1300…1400 МПа (рис. 1). Для проведения сравнительных испытаний были подготовлены образцы КЗ-титанового сплава размером 100×50×15 мм и УМЗ-титанового сплава размером 100х20х20 мм (рис. 2). Фрезерная обработка КЗ- и УМЗ сплавов титана ВТ6 производилась по 8 режимам.

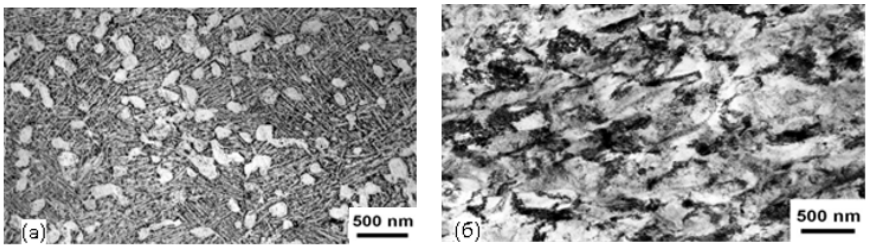


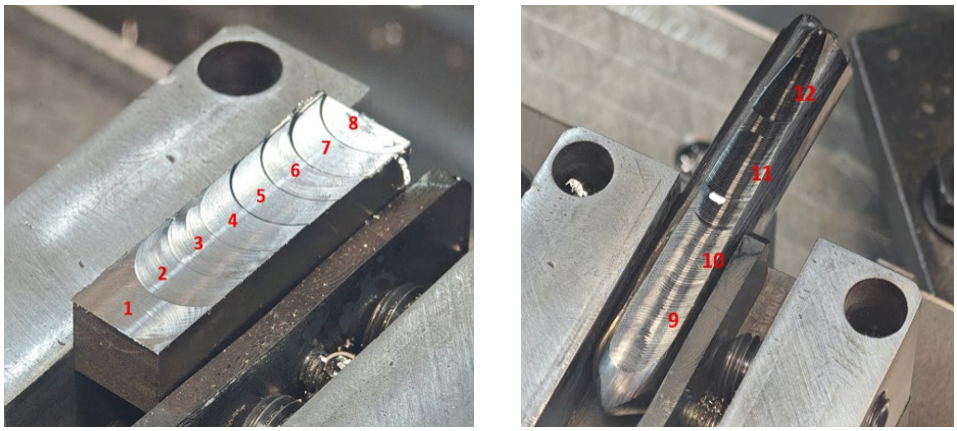
Рис. 1. а – микроструктура УМЗ сплава титана ВТ6 при режиме;
б – микроструктура КЗ сплава титана ВТ6 при режиме
Fig. 1. a – microstructure of UFG titanium alloy VT6 in the given mode;
b – microstructure of CG titanium alloy VT6 in the given mode

Для получения УМЗ структуры использовался метод интенсивной пластической деформации (ИПД) – равноканальное угловое прессование (РКУП). результате модификации структуры предел прочности материала возрос до 1300…1400 МПа, а микротвердость составила 392 ± 4 HV.

Эксперименты проведены на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» механико-технологического факультета Пермского национального ис-

следовательского политехнического университета (ПНИПУ). Исследование выполнены на многопараметрическом исследовательском стенде для диагностики процессов резания труднообрабатываемых материалов. Стенд представляет собой диагностическую платформу, интегрированную с системой ЧПУ, что позволяет проводить прецизионное фрезерование с одновременной высокоскоростной фиксацией динамических характеристик.

Для проведения фрезерной обработки использовались следующие режимы резания (табл. 1).



а) б)

Рис. 2. Схема фрезерования образцов фрезерования на восьми режимах:
а – образцы из КЗ-титанового сплава размером 100×50×15 мм;
б – образцы из УМЗ-титанового сплава ВТ6 размером 100×20×20 мм
Fig. 2. Diagram of milling samples in eight modes: a – samples made of CG titanium alloy, 100×50×15 mm; b – samples made of UFG -titanium alloy VT6, 100×20×20 mm

Таблица 1

Режимы резания УМЗ и КЗ сплавов титана ВТ6

Table 1

Cutting modes for UFG and CG titanium alloys VT6

Режим №	Частота вращения шпинделя *n*, об/мм	Подача фрезы, мм / зуб S	Определение *S* мм/ мин	Глубина *t* , мм	Скорость *V*, м/мин
1/9	630	0,06	75,6	0,05	39,564
2/10	1250	0,06	150	0,05	78,5
3/11	630	0,23	289,8	0,05	39,564
4/12	1250	0,23	575	0,05	78,5
5/13	630	0,06	75,6	0,3	39,564
6/14	1250	0,06	150	0,3	78,5
7/15	630	0,23	289,8	0,3	39,564
8/16	1250	0,23	575	0,3	78,5

В качестве режущего инструмента использовалась универсальная концевая фреза диаметром 20 мм, с 2 зубьями, со сменными твердосплавными пластинами *APMX*1135*PDER* (Белгородский инструментальный завод) с PVD-покрытием (рис. 3). Выбор геометрии и материала пластин обоснован промышленными рекомендациями для чистовой и получистовой обработки титановых сплавов: пластины с радиусом 0,8 мм, стружкодом *APMT/APGT-PM*, сплавом *IP*90*M*, размерами L = 10,83 мм, Ø1.C = 6,16 мм, S = 3,5 мм, d = 2,8 мм и весом 0,003 кг.

Для комплексной диагностики процесса резания применялось следующее сертифицированное оборудование (рис. 4):

1. Измерение составляющих силы резания: динамометр *Dyna-Z* (версия 1.0).

2. Контроль шероховатости поверхности: профилометр *Hommel-Etamic T*8000; замеры параметра проводились на трех участках каждой поверхности в соответствии с ГОСТ 2780-1975.

Анализ микроструктуры и стружки: растровый электронный микроскоп *JEOL JSM*-6490*LV*.

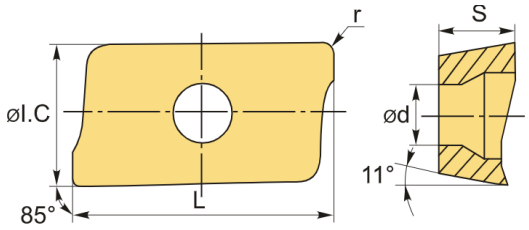
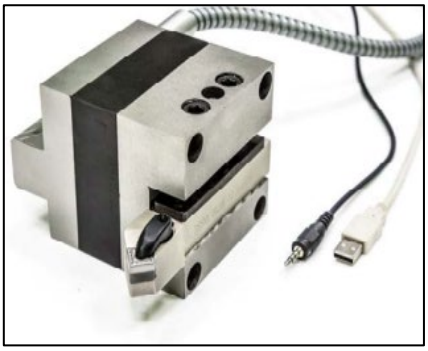


Рис. 3 Геометрия режущей пластины *APMX*1135*PDER*
Fig. 3. Geometry of APMX1135PDER milling insert



а)



б)



в)

Рис. 4. Измерительное оборудование: а – динамометр *Dyna-Z*;
б – профилометр *HOMMEL-ETAMIC T*8000; в– растровый электронный микроскоп *JEOL JSM*-6490*LV*
Fig. 4. Measuring equipment: a – Dyna-Z dynamometer;
b – HOMMEL-ETAMIC T8000 profilometer; c – JEOL JSM-6490LV
scanning electron microscope (SEM)

Обсуждение результатов

Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе фрезерования титанового сплава ВТ6 в крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях, позволил выявить качественные и количественные различия в величине показателей обрабатываемости резанием.

1. Шероховатость поверхности. Исследование микрогеометрии поверхности показало, что УМЗ-структура обеспечивает стабильно более высокие парамет-

ры качества во всем диапазоне исследуемых режимов от 0,39 мкм до 1,04 мкм по Ra для УМЗ сплава титана ВТ6 и от 0,41 мкм до 2,65 для КЗ сплава ВТ6 (табл. 2). Замеры шероховатости проводились по участкам, каждый участок соответствовал режиму обработки, на верней и нижней поверхностях образцов было по 4 режима обработки (рис. 5).

Замеры проводились по три раза на каждом участке.

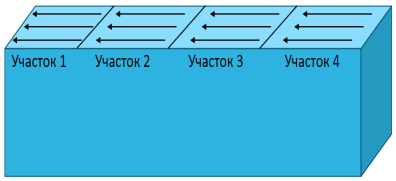


Рис. 5. Участки измерения шероховатости
Fig. 5. Roughness measurement areas

Таблица 2

Результаты замеров шероховатости УМЗ и КЗ сплавов титана ВТ6

Table 2

Results of measuring the roughness of UFG and CG titanium alloys VT6

Режим №	УМЗ титан ВТ6 Ra, мкм			
	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Ср. знач.
1	0,49	0,61	0,47	0,52
2	0,46	0,41	0,42	0,43
3	0,96	1,19	0,97	1,04
4	0,41	0,48	0,50	0,46
5	0,40	0,38	0,39	0,39
6	0,38	0,48	0,39	0,42
7	0,71	1,01	1,13	0,95
8	0,67	0,74	0,73	0,71
Режим №	КЗ титан ВТ6 Ra, мкм			
	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Ср. знач.
9	0,38	0,41	0,43	0,41
10	0,51	0,36	0,45	0,44
11	1,73	1,49	1,98	1,73
12	2,71	2,54	2,69	2,65
13	0,64	0,54	0,67	0,62
14	0,74	0,61	0,59	0,65
15	2,17	2,31	2,33	2,27
16	2,21	2,02	2,32	2,18

Наиболее выраженное преимущество УМЗ-состояния в рамках механической обработки проявляется на более высоких режимах обработки. Так, при подаче S = 0,23 мм/зуб и скорости резания V = 78,5 м/мин (режим 4/12) зафиксировано снижение шероховатости на 82,6 %: с 2,65 мкм для КЗ-сплава до 0,46 мкм для УМЗ-сплава. Физическая сущность данного эффекта заключается в повышении твердости материала, а также в подавлении нестабильного наростообразования и исключении микровырывов материала.

В КЗ-титановом сплаве отделение стружки сопровождается «вырыванием» крупных конгломератов зерен, тогда как субмикронный размер зерна УМЗ-структуры (0,2 мкм) меньше радиуса округления режущей кромки, что реализует механизм стабильного микрорезания [6–7]. Это позволяет достигать требуемых параметров чистовой обработки с шероховатостью Ra менее 0,63 мкм непосредственно после фрезерования, исключая дорогостоящие финишные операции.

2. Силы резания. Сравнительный анализ тангенциальной составляющей силы резания P_z выявил «силовой парадокс»: несмотря на более высокую статическую прочность УМЗ-титана (предел прочности равен 1300 МПа против 1050 МПа у КЗ-титанового сплава), динамические силы

при его фрезеровании на 20–37% ниже, чем у КЗ-аналога (рис. 6).

Снижение сил сопротивления резанию объясняется меньшей пластичностью и вязкостью УМЗ титанового сплава ВТ6, а также экстремальной локализацией деформации сдвига в сверхтонких полосах, ширина которых в УМЗ-материале значительно меньше из-за высокой плотности границ зерен. Дополнительным фактором является феномен «отрицательной усадки» стружки, при котором сокращается длина площадки контакта стружки с передней поверхностью инструмента [8–9]. Это минимизирует работу трения и способствует адиабатическому разупрочнению срезаемого слоя, снижая общую силовую нагрузку на технологическую систему. Вместе с этим, сила резания ускоряет образование опережающей трещины и сдвигов элементов стружки по передней поверхности режущих пластин.

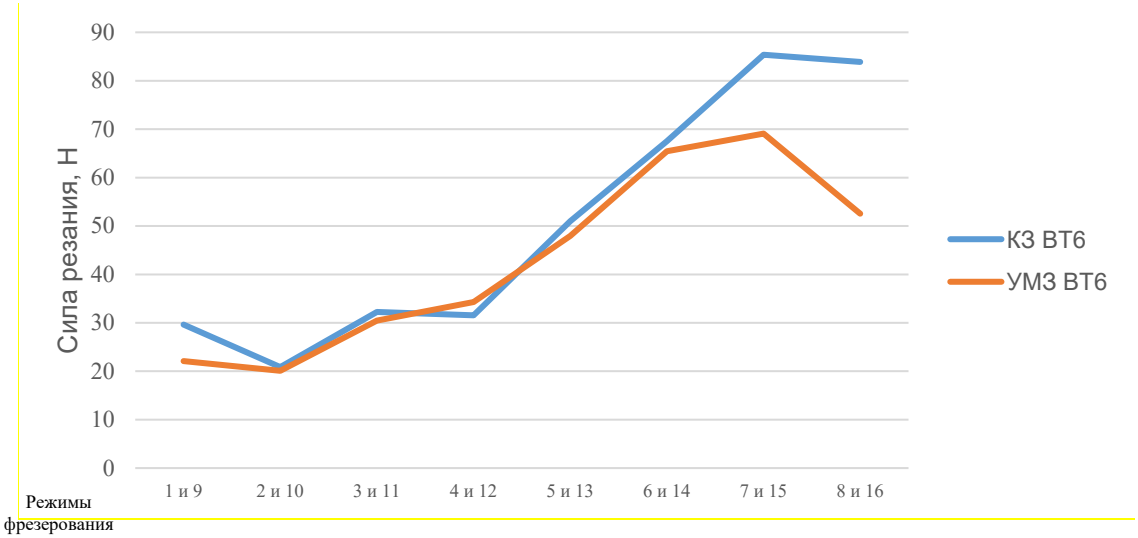
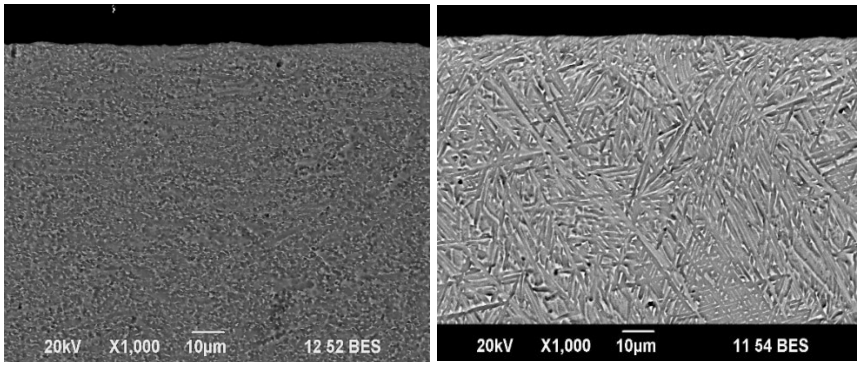


Рис. 6. Зависимость тангенциальной составляющей силы резания P_z от режимов фрезерования и различной структуре образцов ВТ6:
режим 1/9: V= 39,5 м/мин, подаче S= 0,06 мм/зуб и глубине резания t= 0,05 мм
режим 2/10: V= 78,5 м/мин, подаче S= 0,06 мм/зуб и глубине резания t= 0,05 мм
режим 3/11: V= 39,5 м/мин, подаче S= 0,23 мм/зуб и глубине резания t= 0,05 мм
режим 4/12: V= 78,5 м/мин, подаче S= 0,23 мм/зуб и глубине резания t= 0,05 мм
режим 5/13: V= 39,5 м/мин, подаче S= 0,06 мм/зуб и глубине резания t= 0,3 мм
режим 6/14: V= 78,5 м/мин, подаче S= 0,06 мм/зуб и глубине резания t= 0,3 мм
режим 7/15: V= 39,5 м/мин, подаче S= 0,23 мм/зуб и глубине резания t= 0,3 мм
режим 8/16: V= 78,5 м/мин, подаче S= 0,23 мм/зуб и глубине резания t= 0,3 мм
Fig. 6. Dependence of the tangential component of cutting force P_z on milling modes and different structures of VT6 samples.
mode 1/9: V=39.5 m/min, feed S= 0.06 mm/tooth and cutting depth t=0.05 mm
mode 2/10: V=78.5 m/min, feed S= 0.06 mm/tooth and cutting depth t=0.05 mm
mode 3/11: V=39.5 m/min, feed S= 0.23 mm/tooth and cutting depth t=0.05 mm
mode 4/12: V=78.5 m/min, feed S= 0.23 mm/tooth and cutting depth t=0.05 mm
mode 5/13: V=39.5 m/min, feed S= 0.06 mm/tooth and cutting depth t=0.3 mm
mode 6/14: V=78.5 m/min, feed S= 0.06 mm/tooth and cutting depth t=0.3 mm
mode 7/15: V=39.5 m/min, feed S= 0.23 mm/tooth and cutting depth t=0.3 mm
mode 8/16: V=78.5 m/min, feed S= 0.23 mm/tooth and cutting depth t=0.3 mm

3. Микроструктура поверхности и деформированный слой. Результаты растровой электронной микроскопии подтверждают высокую структурную стабильность УМЗ-сплава ВТ6 в процессе механической обработки (рис. 7 и 8).

Для крупнозернистого состояния характерно формирование глубокого наклепа: на режимах с повышенной скоростью. В ультрамелкозернистом сплаве деформированный слой практически отсутствует или не превышает 3 мкм. Высокая плот-

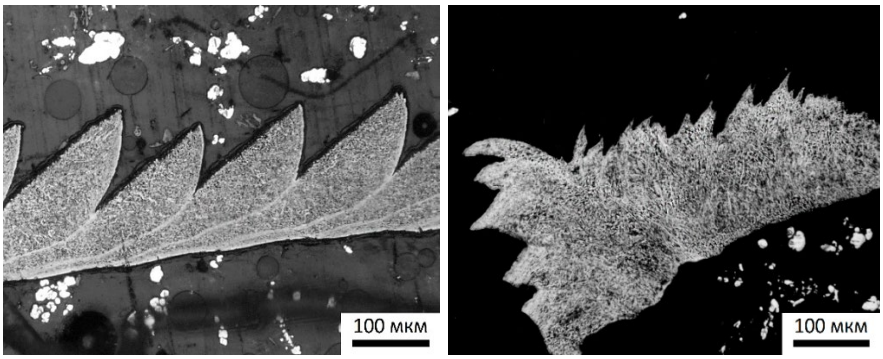
ность большеугловых границ зерен в УМЗ-состоянии выступает в роли барьера, ограничивающего распространение пластической деформации вглубь детали. Это критически важно для сохранения уникальных эксплуатационных свойств материала, так как предотвращает локальную рекристаллизацию и «отжиг» упрочненного слоя, обеспечивая высокий предел выносливости изделий аэрокосмического назначения [10–13].



а) б)

Рис. 7. РЭМ-изображения микроструктуры образцов: а – УМЗ титанового сплава ВТ6; б – КЗ титанового сплава ВТ6

Fig. 7. SEM images of sample microstructures: a – UFG titanium alloy VT6; b – CG titanium alloy VT6



а) б)

Рис. 8. ОМ-изображения микроструктуры стружки, полученной при фрезерной обработке: а – УМЗ титанового сплава ВТ6; б – КЗ титанового сплава ВТ6

Fig. 8. OM images of chip microstructure obtained during milling: a – UFG titanium alloy VT6; b – CG titanium alloy VT6

Экспериментально установлено, что ультрамелкозернистый титановый сплав ВТ6, полученный методом РКУП, демонстрирует существенно лучшую обрабатываемость фрезерованием по сравнению с его крупнозернистым аналогом. Преимущество УМЗ-состояния наиболее выражено при использовании повышенных режимов резания (скоростей и подач), где наблюдается стабилизация процесса стружкообразования.

Наименьшая шероховатость поверхности Ra = 0,39 мкм для УМЗ-титанового сплава достигнута при скорости резания V = 39,5 м/мин, подаче S = 0,06 мм/зуб и глубине резания t = 0,3 мм (режим №5).

При форсированный режим обработки (V = 78,5 м/мин, S = 0,23 мм/зуб) УМЗ-титанового сплава обеспечивает параметр Ra=0,46 мкм, что соответствует требованиям чистового фрезерования. Для получения сопоставимого качества поверхности на КЗ – титановом сплаве при тех же режимах, шероховатость достигает Ra = 2,65 мкм, что требует значительного снижения производительности или проведения дополнительных отделочных операций.

Заключение

Результаты проведенного исследования особенностей обрабатываемости титанового сплава ВТ6 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой позволяют сделать следующие выводы:

1. Ультрамелкозернистый сплав ВТ6, полученный методом равноканального углового прессования, демонстрирует существенно лучшую обрабатываемость резанием (фрезерованием) по сравнению с крупнозернистым аналогом, что подтверждается снижением сил резания, улучшением качества поверхности, а также процессом стружкообразования.

2. Наименьшая шероховатость поверхности (Ra = 0,39 мкм) для УМЗ-сплава достигнута при режиме: скорость резания V = 39,56 м/мин, подача на зуб S = 0,06 мм/зуб и глубина t = 0,3 мм. Установлено, что при переходе к УМЗ-состоянию параметр шероховатости снижается до 82,6 % (с 2,65 мкм до 0,46 мкм) на форсированном режиме обработки (V = 78,5 м/мин, S = 0,23 мм/зуб), что позволяет достигнуть требований чистового фрезерования при значительно более высокой производительности.

3. Выявлен силовой эффект, заключающийся в снижении тангенциальной составляющей силы резания P_z на 20 % для УМЗ-структуры, несмотря на её более высокую статическую прочность (1300…1400 МПа). Основной причиной улучшения обрабатываемости является смена механизма стружкообразования с объемного дислокационного скольжения на экстремально локализованный сдвиг по границам зерен и проявление феномена «отрицательной усадки» стружки, что снижает динамические нагрузки на технологическую систему.

4. Микроструктурный анализ показал, что применение УМЗ-заготовок ВТ6 позволяет минимизировать глубину деформированного приповерхностного слоя до 3 мкм, в то время как у КЗ-сплава она достигает 6 мкм. Это обусловлено сужением зоны первичного сдвига и высокой плотностью большеугловых границ зерен, выступающих барьером для распространения пластической деформации, что гарантирует сохранение эксплуатационной надежности высокопрочного материала.

5. Рекомендуемые рациональные режимы фрезерования сплава ВТ6 с УМЗ-структурой, обеспечивающие баланс между качеством поверхности (Ra < 0,5 мкм) и производительностью обработки: скорость резания V = 78,5 м/мин, подача на зуб S = 0,06…0,23 мм/зуб. Данные параметры позволяют значительно сократить основное технологическое время при изготовлении ответственных деталей авиационного назначения (лопаток и дисков ГТД), сохраняя стабильность уникальных свойств материала.

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.
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.
11. I.P. Semenova A.V. Polyakov M.V. Pesin A.G. Stotskiy Y.M. Modina R.Z. Valiev T.G. Langdon, Strength and fatigue life at 625 K of the ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy produced by equal-channel angular pressing, Metals 2022, 12, 1345. https://doi.org/10.3390/met12081345.
12. G.S. Dyakonov, G.I. Raab, M.V. Pesin, A.V. Polyakov, I.P. Semenova, R.Z. Valiev. Superplastic-like behavior and enhanced strength of a two-phase titanium alloy with ultrafine grains AEM (2022), 24, 2101592. https://doi.org/10.1002/adem.202101592.
13. Fatigue Properties of Ti Alloys with an Ultrafine Grained Structure: Challenges and Achievements. Semenova I.P., Modina Y.M., Stotskiy A.G., Polyakov A.V., Pesin M.V. Metals,2022, 12(2), 312. DOI:10.3390/met12020312.

REFERENCES

1. Ezugwu EO, Bonney J, Yamane Y.. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of 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.
11. Semenova IP, Polyakov AV, Pesin MV, Stotskiy AG, Modina YM, Valiev RZ, Langdon TG, Strength and fatigue life at 625 K of the ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy produced by equal-channel angular pressing, Metals. 2022;12:1345. https://doi.org/10.3390/met12081345.
12. Dyakonov GS, Raab GI, Pesin MV, Polyakov AV, Semenova IP, Valiev RZ. Superplastic-like behavior and enhanced strength of a two-phase titanium alloy with ultrafine grains. AEM. 2022);24:2101592. https://doi.org/10.1002/adem.202101592.
13. Semenova IP, Modina YM, Stotskiy AG, Polyakov AV, Pesin MV. Fatigue Properties of Ti Alloys with an Ultrafine Grained Structure: Challenges and Achievements. Metals. 2022;12(2):312. DOI:10.3390/met12020312.

Информация об авторах:

Коногорова Луиза Викторовна – директор Бизнес-инкубатора «ПНИПУ Динамика роста».
Песин Михаил Владимирович – доктор технических наук, доцент, декан МТФ.
Макаров Владимир Федорович – доктор технических наук, профессор.
Хабарова Анастасия Вячеславовна – профконсультант, тел. 8-919-913-77-44.

Konogorova Luiza Viktorovna – Director of the Business Incubator "PNRPU Dynamics of Growth".
Pesin Mikhail Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Mechanics and Technology Department, ORCID 0000-0003-0194-5965.
Makarov Vladimir Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor.
Khabarova Anastasia Vyacheslavovna – Professional Consultant, phone: 8-919-913-77-44.

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 23.06.2026; одобрена после рецензирования 17.08.2026; принята к публикации 27.08.2026. Рецензент – Съянов С.Ю., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 23.06.2026; approved after review on 17.08.2026; accepted for publication on 27.08.2026. The reviewer is Syanov S.Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.