

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.15-23.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.15-23.

Научная статья

УДК УДК 621.91

doi: 10.30987/2223-4608-2024-15-23

Особенности обрабатываемости резанием новых высокопрочных титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой для деталей авиационной техники

Владимир Федорович Макаров¹, д.т.н.

Михаил Владимирович Песин², д.т.н.

Луиза Викторовна Коногорова³, аспирант

Анастасия Вячеславовна Хабарова⁴, аспирант

Ринат Саубанович Абзаев⁵, аспирант

^{1, 2, 3, 4, 5} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

¹ makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

² m.pesin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ konogorova98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ habarovanastya98@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁵ pineforest.car@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров резания (скорости резания, подачи, глубины резания) на шероховатость R_a , микроструктуру поверхностного слоя образцов сплава Ti-6Al-4V с обычной крупнозернистой (КЗ) и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной методом равнонапряженного углового прессования. В рамках решения задачи исследования обрабатываемости нового сплава ВТ6 с УМЗ структурой проведена разработка методики экспериментальных исследований при точении. Определены такие физические параметры, как вибрации и шум при резании, потребляемая мощность, численные параметры шероховатости, величина и характер распределения остаточных напряжений и др. в зависимости от режимов резания и применяемого инструмента. Показано, что при точении на небольшой скорости резания шероховатость КЗ образца лучше, чем УМЗ сплава. При повышении скорости резания в 1,5 раза, наоборот, образец с УМЗ структурой имеет более низкую шероховатость R_a по сравнению с КЗ образцом. Обсуждаются различия в морфологии и микроструктуре образующейся при сравнительной обработке стружки в зависимости от типа микроструктуры обрабатываемого сплава, а именно, наличие линий пластического течения в микроструктуре стружки после точения УМЗ образца, формирование крупных сдвигов, сколов и микротрещин в стружке после точения КЗ сплава. Установлено, что новые титановые сплавы при токарной обработке имеют лучшую обрабатываемость резанием по таким параметрам, как шероховатость поверхности, шум и вибрация при резании, более благоприятный характер остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое. По этим факторам можно предсказать значительное уменьшение износа инструмента и повышение его стойкости по сравнению с обработкой обычного крупнозернистого титана.

Ключевые слова: режимы резания, шероховатость, ультрамелкозернистая структура, титановые сплавы, микроструктура, стружкообразование, пластическая деформация, обрабатываемость резанием

Для цитирования: Макаров В.Ф., Песин М.В., Коногорова Л.В., Хабарова А.В., Абзаев Р.С. Особенности обрабатываемости резанием новых высокопрочных титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой для деталей авиационной техники // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2024-15-23

Cutting ability features for new high-strength titanium alloys with an ultrafine-grained structure used for aircraft parts

Vladimir F. Makarov¹, D. Eng.

Mikhail V. Pesin², D. Eng.

Louisa V. Konogorova³, PhD student

Anastasia V. Khabarova⁴, PhD student

Rinat S. Abzaev⁵, PhD student

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

¹ makarovv@pstu.ru

² m.pesin@mail.ru

³ konogorova98@mail.ru

⁴ habarovanastya98@yandex.ru

⁵ pineforest.car@yandex.ru

Abstract. The results of experimental studies of the cutting parameters effect (cutting speed, feed, depth-of-cut) on the roughness of Ra, the microstructure of the surface layer of Ti-6Al-4V alloy samples with a conventional coarse-grained (CG) and ultrafine-grained (UFG) structure obtained by equal-channel angular pressing are presented. In framework of solving the problem connected with studying the machinability of a new VT6 alloy having an UFG structure, the development of a methodology for experimental research under turning was carried out. Physical parameters such as vibrations and noise under cutting, power consumption, numerical parameters of roughness, the magnitude and the pattern of residual stresses distribution and others are determined according to cutting modes and the tool used for the operation. It is shown that when turning at a low cutting speed, the roughness of CG sample is better than UFG of the alloy. With an increase in the cutting speed by 1,5 times, on the contrary, a sample with an UFG structure has a lower roughness Ra compared to a CG sample. Differences in the morphology and microstructure of the chips formed within comparative machining are discussed, taking into account types of microstructure of the alloy being treated, namely, presence of plastic flow lines in the chip microstructure after turning an UFG sample, the formation of large shifts, chips and tiny fractures in the chips after turning a CG alloy. It is found that new titanium alloys under turning obtain better cutting machinability in terms of such parameters as surface roughness, noise and vibration under cutting, and a more favorable character of residual stresses and riveting in the surface layer. Studying these factors, it is possible to predict a significant reduction of tool wear and stabilization of its durability compared to conventional coarse-grained titanium treatment.

Keywords: cutting modes, roughness, ultrafine-grained structure, titanium alloys, microstructure, chip formation, plastic deformation, machinability (cutting ability)

For citation: Makarov V.F., Pesin M.V., Konogorova L.V., Khabarova A.V., Abzaev R.S. Cutting ability features for new high-strength titanium alloys with an ultrafine-grained structure used for aircraft parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2024-15-23

Введение

Сплавы на основе титана нашли свое широкое применение в авиастроении, в частности в конструкциях авиационных газотурбинных двигателей. Титановые сплавы используются преимущественно для изготовления таких ответственных деталей, как направляющие аппараты и диски компрессора, лопатки компрессора, втулки, валы и др. [1]. Большинство титановых сплавов относятся к высокопрочным труднообрабатываемым. Режимы резания и стойкость режущего инструмента намного ниже, чем при обработке сталей. Изучение и разработка таких сплавов в данной отрасли продолжают уже на протяжении более 50 лет [9, 10].

С появлением в нашей стране новых более эффективных моделей авиационных газотурбинных двигателей типа ПД-14, ПД-8, и др. получение еще более прочных высококачественных деталей из титановых сплавов и решение проблем обрабатываемости их резанием в процессе изготовления является одной из актуальных задач современного машиностроения.

Как известно, разрушение деталей в большинстве случаев начинается с поверхности, которая характеризуется такими параметрами, как шероховатость, остаточные напряжения, волнистость, наклеп, микроструктура и др. Качество поверхности деталей, в свою очередь, определяется режимами и условиями механообработки поверхности.

Низкая обрабатываемость резанием титановых сплавов определяется малой пластичностью, характеризующейся высоким коэффициентом упрочнения в процессе резания, примерно в два раза большим, чем у жаропрочных сталей и сплавов. Кроме этого, высокая химическая активность титановых сплавов к кислороду, азоту, водороду вызывает интенсивное охрупчивание поверхностного слоя сплавов вследствие диффузии в него атомов газов при повышении температуры в процессе резания. При этом растут контактные давления, напряжения и температура резания, что повышает интенсивность изнашивания инструмента. Из-за плохой теплопроводности титановых сплавов повышенный нагрев в зоне резания способствует усилению адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала с материалом инструмента и появление чешуйчатости, задиров от разрушения наростов, ухудшению шероховатости обработанной поверхности на поверхности.

В последние десятилетия большое внимание уделяется исследованию наноструктурных и ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [2 – 4]. Сплавы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, в том числе титановые сплавы с УМЗ структурой, имеют заметное преимущество перед крупнозернистыми, выпускаемые промышленностью, по прочности и сопротивлению усталости. Однако здесь возникает вопрос влияния более высокой твердости и прочности этих новых титановых сплавов на обрабатываемость их резанием. Поэтому необходимо провести широкие комплексные экспериментальные исследования по выбору наиболее рациональных параметров обработки резанием при изготовлении деталей из титановых сплавов с УМЗ структурой с целью получения требуемых показателей качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. В данном направлении научных исследований проведено явно недостаточно. В частности, в работе [6] сообщается, что формирование в титане нано- или УМЗ структуры методами ИПД снижает

адгезионную составляющую коэффициента трения и уменьшает его склонность к схватыванию [8].

Для исследования обрабатываемости резанием новых титановых сплавов с УМЗ структурой использовались заготовки из сплава Ti-6Al-4V, полученные методом равноканального углового прессования на оборудовании УГАТУ (г. Уфа) [3]. При анализе микроструктуры заготовок установлено, что исходная бимодальная микроструктура (КЗ) сплава ВТ6 состоит из β -структуры со средним размером вторичной α -фазы 1 мкм и зерен первичной α -фазы размером около 8 мкм, объемная доля которой не превышала 25 %. После интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования типичная УМЗ структура титанового сплава ВТ6 имеет средний размер зерен α - и β -фазы 250 нм [3]. В работах проф. Валиева Р.Р. [2] исследовалась прочность ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6. По результатам испытаний установлено следующее: предел прочности титанового сплава с УМЗ структурой составил в среднем 1450 МПа, для сплава (КЗ) с обычной бимодальной структурой - 1050 МПа, т. е. сплав ВТ6 с УМЗ структурой имеет повышенную в 1,5 раза прочность поверхности по сравнению с обычным сплавом. В статье Ильясовой А.Х. представлены данные, что измельчение микроструктуры титанового сплава ВТ6 до УМЗ состояния позволяет повысить не только прочность, но и микротвердость [4].

На формирование параметров качества поверхностного слоя деталей и прежде всего на величину численных параметров шероховатости обработанной поверхности детали оказывают влияния многие технологические факторы. При обработке резанием величина, форма и направление микронеровностей зависят от методов, режимов, схемы обработки и геометрии инструмента. Из параметров режимов резания наиболее существенное влияние на величину шероховатости поверхности оказывают скорость резания и подача инструмента [10].

Целью данной работы является проведение комплексных экспериментальных исследований влияния параметров резания (скорости резания v , м/мин; глубины резания t , мм; подачи S_0 , мм/об) на шероховатость обработанной поверхности образцов, остаточные напряжения, микротвердость и микроструктуру поверхностного слоя с обычной КЗ и УМЗ структурой, а также и на процесс стружкообразования.

Методики проведения исследований

Для проведения сравнительных исследований выбран наиболее применяемый в авиационной технике титановый сплав Ti-6Al-4V (Ti - основа, Al – 6,6 %; V – 4,9 %; Zr – 0,02 %; Si – 0,033 %; Fe – 0,18 %; C – 0,007 %; O₂ – 0,17 %; N₂ – 0,01 %; H₂ – 0,002 %). Температура полиморфного превращения сплава составляла 975 ± 5 °С. Для проведения исследования использованы исходные заготовки в виде прутков с крупнозернистой структурой и заготовки с УМЗ структурой, которая получена методом равноканального углового прессования (РКУП) в четыре прохода в оснастке с углом пересечения каналов $\psi = 120^\circ$ при температуре 700 °С [4]. Заготовки диаметром 40 мм и длиной 225 мм подвергались термообработке, которая включала предварительную термическую обработку закалкой с $T = 950$ °С (нагрев 20 мин) с последующим отжигом при 675 °С в течение 4 ч с целью повышения эффективности измельчения зерна в заготовке.

Для механической обработки выбран токарно-винторезный станок с УЦИ (устройство цифровой индикации) фирма JET, модель GN-1640ZX (Китай).

В качестве режущего инструмента выбран сборный токарный проходной резец державка – PCLNR2525-M16 с механическим креплением режущей сменной многогранной пластины CNMG 160608-46 производства фирмы «Сандвик МКТС» (Россия) из твердого сплава типа BK8.

Обработка заготовок проводилась точением нескольких участков длиной

8...10 мм на восьми различных режимах резания согласно многофакторному плану экспериментов. Исходный диаметр заготовки составлял 30 мм. Всего применено восемь вариаций режима обработки, определяющих скорость, интенсивность резания и т. п. Общий вид заготовки УМЗ сплава ВТ6 с поясками и номерами использованных режимов резания представлен на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Общий вид исходной заготовки (а) и ступенчатого образца, обработанного на восьми режимах резания (б) из сплава ВТ6 с УМЗ структурой

Fig. 1. General view of the part blank (a) and the steplike sample machined by eight cutting modes (b) made of VT6 alloy having UFG structure

Выбор диапазона рациональных режимов резания образцов из сплава ВТ6 с КЗ и УМЗ структурой проведен с учетом данных, полученных при анализе литературы и рекомендаций каталогов производителей инструментов, а также возможностей применяемого оборудования. Для исследований и анализа результатов используется известный метод планирования многофакторных экспериментов со статической обработкой и регрессионным анализом результатов. Режимы резания заготовок представлены согласно разработанному плану экспериментов (табл. 1).

1. Режимы токарной обработки титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами

1. Turning modes of titanium alloys having CG and UFG structures

№ участка	v , м/мин	S_0 , мм/об	t , мм
1	48	0,06	0,25
2	48	0,06	0,50
3	48	0,11	0,25
4	48	0,11	0,50
5	72	0,06	0,25
6	72	0,06	0,50
7	72	0,11	0,25
8	72	0,11	0,50

Для записи на каждом режиме резания наиболее значимых, по нашим предварительным данным, физических параметров процесса резания – вибрации, шума резания, мощности резания на станке использован разработанный компьютерный центр диагностики процесса резания кафедры ИТМ в ПНИПУ [6].

Для исследований микроструктуры титановых сплавов на каждом режиме резания проведен разрез заготовок с КЗ и УМЗ структурами на две половины по оси вращения. С целью исключить влияние разогрева в процессе разрезания разрез проводился проволочным электроэрозионным методом с полным погружением заготовки в бак с рабочей жидкостью. Для удобства подготовки шлифов и помещения в камеру микроскопа исследуемая половина разделена на две части по четыре пояска с разными режимами обработки. После чего на каждом пояске срезы были отполированы и протравлены раствором кислот, соответствующим выявлению микроструктуры.

Исследование микроструктуры поверхностного слоя обработанных на различных режимах образцов проведено с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN РЭМ во вторично отраженных электронах.

Для измерения величины шероховатости на поясках образцов выбран переносной профилометр MarSurf PS1. Максимальный

диапазон измерения – 350 мкм (от -200 мкм до +150 мкм).

Исследование влияния режимов резания на формирование поверхностных остаточных напряжений на всех участках обработанных образцов из титановых сплавов проводилось на рентгеновском дифрактометре мод. Xstress Robot (StressTech OY, Финляндия).

Микротвердость образцов по методу Виккерса определяли на автоматическом микротвердомере Emco Test DuraScan-50. Максимально прикладываемая нагрузка на индентор составляла 0,98 Н, время выдержки 10 с. Для расчета среднего значения микротвердости проводили не менее сорока измерений диагональных отпечатков. Проводились сравнительные измерения микротвердости на поверхности и в центре образцов, обработанных на низкой и повышенной скорости резания.

Анализ результатов исследований обрабатываемости титановых сплавов

Шероховатость. Результаты исследования, полученные методом планирования многофакторных экспериментов, влияния на величину шероховатости Ra поверхности глубины резания t , подачи S_0 и скорости резания v на восьми участках КЗ заготовки и УМЗ заготовки в среднем по трем опытам приведены в табл. 2.

2. Результаты измерения шероховатости Ra_{cp} на восьми участках образцов с КЗ и УМЗ структурами

2. The results of measuring the roughness of Ra_m in eight sections of samples having CG and UFG structures

№ участка	v, м/мин	S_0 , мм/об	t, мм	Ra_{cp} КЗ	Ra_{cp} УМЗ
1	48	0,06	0,25	0,408	0,429
2	48	0,06	0,50	0,468	0,692
3	48	0,11	0,25	0,446	0,772
4	48	0,11	0,50	0,453	0,795
5	72	0,06	0,25	0,677	0,410
6	72	0,06	0,50	1,069	0,446
7	72	0,11	0,25	0,797	0,759
8	72	0,11	0,50	1,427	0,787

По результатам обработки этих экспериментальных данных, со статической обработкой и регрессионным анализом результатов получены адекватные эмпирические

математические модели зависимости шероховатости от параметров режимов резания в следующем виде:

– для титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой:

$$Ra_{UMZ} = 0,014 - 0,004v + 1,25S_0 + 2,11t + 0,12vS_0 - 0,02vt - 6,74S_0t; \quad (1)$$

– для титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой:

$$Ra_{KZ} = -4,22 + 0,10v + 27,12S_0 + 8,4t - 0,61vS_0 - 0,19vt - 57,98S_0t + 1,33vS_0t. \quad (2)$$

В результате анализа этих зависимостей (1) и (2) можно сделать выводы, что для сплава с УМЗ структурой с увеличением скорости резания шероховатость снижается, а для сплава с КЗ структурой увеличение скорости резания приводит к увеличению шероховатости. В обоих случаях с увеличением подачи шероховатость значительно повышается. Влияние же глубины резания на шероховатость незначительное.

Кроме того, установлено, что при обработке по режимам № 1 – 4 при меньшей скорости резания ($v = 48$ м/мин) заготовки с КЗ структурой имеют меньшую шероховатость ($Ra = 0,408...0,468$ мкм) по сравнению с заготовкой с УМЗ структурой ($Ra = 0,429...0,795$ мкм). При повышении скорости резания до $v = 72$ м/мин установлена обратная картина: Шероховатость заготовки с УМЗ структурой имеет более низкую величину ($Ra = 0,410...0,787$ мкм) по сравнению с

шероховатостью заготовки с КЗ структурой ($Ra = 0,677...1,427$ мкм). В целом, следует отметить, что наименьшая шероховатость при точении заготовки с УМЗ структурой $Ra = 0,410$ мкм получена на более высокой скорости резания по режиму № 5 ($v = 72$ м/мин), а при точении заготовки с КЗ структурой $Ra = 0,408$ мкм на меньшей скорости резания по режиму № 1 ($v = 48$ м/мин) при одинаковой наименьшей подаче $S_0 = 0,06$ мм/об и глубине резания $t = 0,25$ мм.

Остаточные напряжения. На основании полученных данных исследования образцов на рентгеновском дифрактометре мод. Xstress Robot построены графики фактических значений осевых остаточных напряжений на восьми участках образцов из сплавов ВТ6 с УМЗ и КЗ структурами. Диапазон значений остаточных напряжений для образцов из КЗ и УМЗ составил от -80 до 170 МПа. Установлено, что остаточные напряжения носят

преимущественно благоприятный сжимающий характер независимо от размера зерна титановых сплавов и режимов резания.

Микротвердость. Результаты сравнительных исследований микротвердости

поверхностного слоя и сердцевины образцов, обработанных на двух скоростях резания 48 м/мин и 72 м/мин приведены в табл. 3.

3. Результаты измерения микротвердости на поверхности и в центре образцов заготовок титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами

3. Results of measuring microhardness on the surface and in the center of samples of titanium alloy blanks with CG and UFG structures

Скорость резания v , м/мин	Микротвердость поверхности/центра КЗ заготовки, HV	Микротвердость поверхности/центра УМЗ заготовки, HV
48	336 ± 8/335 ± 10	379 ± 9/380 ± 10
72	332 ± 8/335 ± 10	382 ± 10/380 ± 10

В результате анализа табл. 3 установлено, что микротвердость титанового сплава с УМЗ структурой выше в среднем на 15 %, чем микротвердость титанового сплава с КЗ структурой, что связано с уменьшением размера структурных и фазовых составляющих после интенсивной пластической деформации методом РКУП. При этом средние значения микротвердости в центре и в поверхностном слое обработанной заготовки независимо от режимов резания практически одинаковые как для КЗ, так и УМЗ заготовки, что указывает на отсутствие значительных деформаций и локального перегрева структуры в зоне контакта с резцом при точении.

Микроструктура. На рис. 2 и 3, приведены сравнительные фотографии микроструктур поверхности образцов титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами в исходном состоянии и после РКУП, а также микроструктур образцов после токарной обработки на различных режимах резания.

В результате анализа этих фотографий микроструктур установлено много интересных факторов. Например, микроструктура КЗ сплава ВТ6 в горячекатаном состоянии (см. рис. 2, а) представляет собой типичную β -превращенную структуру титанового сплава с размером зерен 8...10 мкм и состоит из пакетов пластин α -фазы (серого цвета), имеющих различную кристаллографическую ориентацию в зависимости от ориентации исходных β -зерен. Сплошные прослойки остаточной β -

фазы (белого цвета, см. рис. 2, а) расположены на межфазных границах.

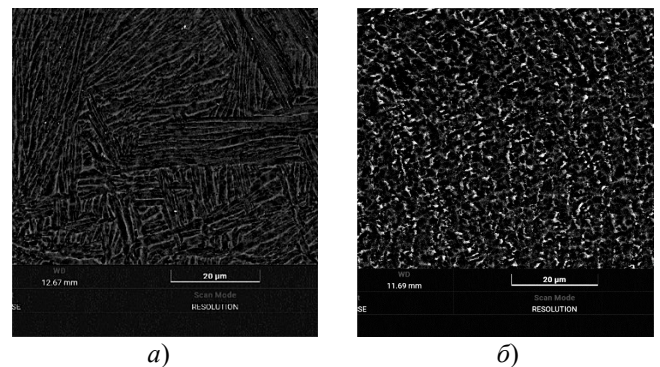


Рис. 2. Микроструктура заготовок сплава ВТ6 в исходном состоянии (КЗ) (а) и после РКУП (УМЗ) (б)

Fig. 2. Microstructure of VT6 alloy blanks in the initial state (CG) (a) and after EChAP (UFG) (b)

После интенсивной пластической деформации методом РКУП в сплаве ВТ6 с УМЗ микроструктурой (см. рис. 2, б) наблюдается деформация и искривление пластин, формирование внутри них мелких субзерен равноосной формы, β -фаза становится не сплошной, а локализованной в виде отдельных зерен размером менее 1 мкм (белого цвета). Таким образом, структура сплава ВТ6 после РКУП представляет собой смесь ультрамелких зерен размером около 250 нм и субзерен размером меньше 1 мкм.

В результате сравнительного анализа микроструктур титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами после токарной обработки на

восьми режимах резания установлено отсутствие поврежденного слоя вследствие тепловых или силовых деформаций на поверхности заготовок после точения сплавов КЗ и УМЗ (рис. 3, а и б) на одном и том же повышенном режиме резания ($v = 72$ м/мин; $S_0 = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм). Это позволяет говорить о возможности бездефектного применения повышенных скоростей резания.

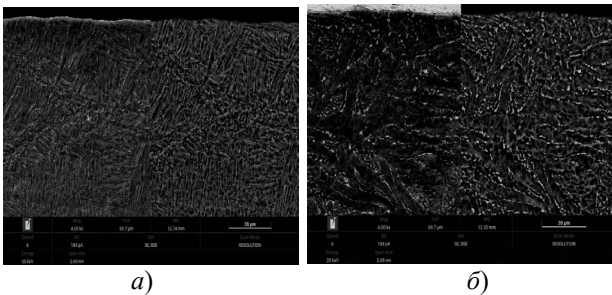


Рис. 3. Микроструктура поверхностной зоны образцов титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой (а) и с УМЗ структурой (б) при режиме резания ($v = 72$ м/мин; $S_0 = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

Fig. 3. Microstructure of the surface zone of the samples of titanium alloy VT6 having CG structure (a) and UFG structure (b) in cutting mode ($v = 72$ m/min; $S_0 = 0,11$ mm/rpm; $t = 0,5$ mm)

При анализе влияния различных наиболее характерных режимов резания на изменение микроструктуры обработанного поверхностного слоя образцов титанового сплава с УМЗ структурой, полученные с помощью светового оптического микроскопа Olympus GX51, установлено что микроструктура сплава однородная по всей плоскости среза образцов и не имеет признаков локального перегрева. При более крупном увеличении снимков шлифов микроструктуры поверхностного слоя на глубине около 1 мм от поверхности признаков локального перегрева также не наблюдается. То есть можно сделать вывод, что токарная обработка сплава ВТ6 с УМЗ структурой на всех восьми режимах резания не приводит к формированию особого выраженного слоя со своей характерной только ему микроструктурой.

Вибрации, шум и мощность резания. На основании сравнительного анализа результатов записи физических параметров резания на компьютерном центре диагностики установлено снижение вибрации, шума и мощности резания при токарной обработке титанового сплава ВТ6

с УМЗ структурой на 15...20 % по сравнению с обработкой титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой.

Заключение

Таким образом, результаты настоящего исследования особенностей обрабатываемости сплава Ti-6Al-4V с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой, позволяют сделать следующие выводы:

1. Новый титановый сплав ВТ6 с УМЗ структурой имеет повышенную в 1,5 раза прочность и твердость, более высокое сопротивление усталости поверхности по сравнению с обычным крупнозернистым сплавом;

2. Новые титановые сплавы с УМЗ структурой при токарной обработке имеют лучшую обрабатываемость резанием по таким параметрам, как шероховатость поверхности, шум и вибрация при резании, более благоприятный характер остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое. По этим факторам можно предсказать значительное уменьшение износа инструмента и повышение его стойкости по сравнению с обработкой обычного крупнозернистого титана;

3. Наименьшая шероховатость ($Ra = 0,408...0,410$ мкм) достигнута для сплава с УМЗ структурой при более высокой скорости $v = 72$ м/мин, чем при обработке КЗ заготовки при скорости $v = 48$ м/мин, что является благоприятным фактором для повышения в 1,5 раза производительности механообработки.

4. Рекомендуемые режимы резания при полустовом точении титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой, следующие: скорость резания 75...80 м/мин, подача 0,05...0,07 мм/об, глубина резания 0,25...0,35 мм. При этом обеспечивается требуемая для деталей ГТД шероховатость $Ra = 0,4...0,5$ мкм.

5. Таким образом, установлено, что обрабатываемость титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой лучше, чем применяемого для деталей ГТД титанового сплава ВТ6 с крупнозернистой структурой. Скорость резания и производительность обработки деталей из титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой увеличивается в 1,5 раза при обеспечении требований по качеству обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: сб. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
2. Валиев Р.З., Усманов Л.Р., Резяпова Л.Р. Сверхпрочность наноструктурных металлических материалов: физическая природа и механизмы упрочнения // Физика металлов и металловедение. 2022.-Т.123. № 12. С.1355–1361.
3. Semenova I., Polyakov A., Gareev A., Makarov V., Kazakov I., Pesin M. Machinability Features of Ti-6Al-4V Alloy with Ultrafine-Grained Structure. Metals 2023, 13, x. <https://doi.org/10.3390/>
4. Ильясова А.Х., Сафин Э.В. Механические свойства и микротвердость титанового сплава ВТ6 с нанокристаллической и микрокристаллической структурами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. №6. С. 120–121.
5. Макаров В.Ф., Койнов И.И., Абзаев Р.С., Ширинкин В.В., Мешкас А.Е. Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 12 (66). С. 24–28
6. Сафин Э.В. Формирование и оценка показателей качества титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой // Universum: технические науки. 2017. № 12 (45).
7. Astakhov P.A. On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation // International Journal of Mechanical Science, 2005. № 47. P. 1649–1672.
8. Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш., Чертовских С.В. и др. Триботехнические характеристики титана с ультрамелкозернистой структурой // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 2. С. 208–214.
9. Максаров В.В., Ефимов А.Е., Важенин А.Ю. Совершенствование технологии механической обработки титановых сплавов посредством применения предварительного пластического воздействия // Металлообработка. 2019. № 3 (111). С. 20–26.
10. Ларионова Т.А., Жуков Э.Л., Плавник С.Л. Определение рациональных режимов резания перспективных титановых сплавов на основе математической модели - Неделя науки СПбПУ // Матер. Науч. форума с междунар. участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. М.С.

Кокорин (отв. ред.). СПб.: Изд-во Политех. ун-та. 2015. С. 223–225.

REFERENCES

1. Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Koryakovtsev A.S. Titanium alloys in products developed by Aviadvigatel OJSC // Modern titanium alloys and problems of their development: proc.: Moscow: VIAM, 2010, pp. 43–46.
2. Valiev R.Z., Usmanov L.R., Rezyapova L.R. Super strength of nanostructured metallic materials: the physical nature and mechanisms of hardening // Physics of metals and metallurgical science. 2022. vol.123, no.12. pp.1355–1361.
3. Semenova I., Polyakov A., Gareev A., Makarov V., Kazakov I., Pesin M. Machinability Features of Ti-6Al-4V Alloy with Ultrafine-Grained Structure. Metals 2023, 13, x. <https://doi.org/10.3390/>
4. Ilyasova A.H., Safin E.V. Mechanical properties and microhardness of titanium alloy VT6 having nanocrystalline and microcrystalline structures // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2010, no. 6, pp. 120–121.
5. Makarov V.F., Konov I.I., Abzaev R.S., Shirinkin V.V., Meshkov A.E. Features of diagnostics of the cutting process when drilling composite materials // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2016, no. 12 (66). pp. 24–28.
6. Safin E.V. Formation and evaluation of quality indicators of BT6 titanium alloy with the ultra-fine grain structure // Universum: Technical sciences. 2017, no. 12 (45).
7. Astakhov P.A. On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation // International Journal of Mechanical Science, 2005. № 47. P. 1649–1672.
8. Shuster L.Sh., Migranov M.Sh., Chertovskikh S.V., et al. Tribotechnical characteristics of titanium with an ultrafine-grained structure // Friction and wear. 2005, vol. 26, no. 2, pp. 208–214.
9. Maksarov V.V., Efimov A.E., Vazhenin A.Yu. Improvement of technology of machining of titanium alloys through use of preliminary plastic impact // Metalworking. 2019, no. 3 (111), pp. 20–26.
10. Larionova T.A., Zhukov E.L., Fin S.L. Determination of rational cutting modes of promising titanium alloys based on a mathematical model - Week of Science of SPbPU // Proceedings of Scientific forum with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport. M.S. Kokorin (ed.), St. Petersburg: Publishing House of Polytech. Univ. 2015, pp. 223–225.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.03.2024; одобрена после рецензирования 02.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 11.03.2024; approved after reviewing 02.04.2024; assepted for publication 17.04.2024.