

## Шероховатость и микротвердость ультрамелкозернистого титана Grade 4, подвергнутого безабразивной ультразвуковой финишной обработке

© 2022

*Асфандияров Рашид Наилевич*\*<sup>1,2,4</sup>, кандидат технических наук, научный сотрудник,  
доцент кафедры материаловедения и физики металлов

*Рааб Георгий Иосифович*<sup>3</sup>, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

*Гундеров Дмитрий Валерьевич*<sup>1,2,5</sup>, доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник института физики молекул и кристаллов,  
профессор кафедры материаловедения и физики металлов

*Аксенов Денис Алексеевич*<sup>1,2,6</sup>, младший научный сотрудник

*Рааб Арсений Георгиевич*<sup>2</sup>, кандидат технических наук, научный сотрудник

*Гундерова Софья Дмитриевна*<sup>2</sup>, студент

*Шишкунова Мария Андреевна*<sup>2</sup>, магистрант

<sup>1</sup>Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук, Уфа (Россия)

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)

<sup>3</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск (Россия)

\*E-mail: a.r.n@list.ru

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5522-4314>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5925-4513>

<sup>6</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2652-2646>

Поступила в редакцию 28.04.2022

Принята к публикации 16.08.2022

**Аннотация:** Повышение сопротивления усталости имплантатов является важной научно-технической задачей. Одним из решений данной задачи является формирование высокопрочного состояния за счет ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Однако для высокопрочных сплавов характерна большая чувствительность к концентраторам напряжений и параметру шероховатости поверхности. В свою очередь, конструкции имплантатов, как правило, подразумевают наличие концентраторов в виде различных канавок, резьбовых элементов и т. д., а технология их изготовления подразумевает механическую обработку с неоднозначным влиянием на поверхность готового изделия. Вариантом решения обозначенной проблемы является применение дополнительной финишной обработки поверхности, например методом безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО). Целью настоящей работы является исследование влияния различных режимов БУФО на микротвердость и шероховатость цилиндрической заготовки из технически чистого титана марки Grade 4 в УМЗ состоянии. В ходе исследования проведена оценка влияния на параметры поверхности частоты вращения заготовки и статической силы прижатия инструмента к обрабатываемой заготовке. Проведены микроструктурные исследования полученных образцов. Результаты показали, что обработка титана в УМЗ состоянии методом БУФО приводит к значительному повышению микротвердости поверхности и снижению ее шероховатости. Так, в зависимости от режима прирост микротвердости может достигать от 2 до 3,5 раз. Было изучено влияние уровня мощности ультразвукового воздействия на шероховатость и микротвердость. Рассмотрены различные варианты предварительной обработки поверхности. Выявлено, что увеличение скорости вращения заготовки уменьшает шероховатость обработанной заготовки, а микротвердость при этом увеличивается.

**Ключевые слова:** безабразивная ультразвуковая финишная обработка; УМЗ; ультрамелкозернистая структура титана Grade 4; шероховатость; микротвердость.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00124, <https://rscf.ru/project/21-79-00124/>.

**Для цитирования:** Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И., Гундеров Д.В., Аксенов Д.А., Рааб А.Г., Гундерова С.Д., Шишкунова М.А. Шероховатость и микротвердость ультрамелкозернистого титана Grade 4, подвергнутого безабразивной ультразвуковой финишной обработке // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 3. С. 41–49. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-41-49.

### ВВЕДЕНИЕ

подавляющее большинство имплантатов в организме человека работают в условиях активных нагрузок, вызывающих повторные или повторно-переменные напряжения. При длительном воздействии данных напряжений в материале имплантата происходит изменение свойств, постепенное накопление повреждений, зарождение и развитие трещины, и в конечном итоге разрушение. Такое разрушение является усталостным

и относится к наиболее распространенным причинам выхода изделий из строя. Имплантаты относятся к особо ответственным изделиям, так как от их качества и надежности зависит здоровье, а в ряде случаев и жизнь пациентов. Исходя из вышесказанного, повышение сопротивления усталости имплантатов является важной научно-технической задачей.

Решение проблемы повышения сопротивления усталости имплантатов осложняет ряд особенностей процесса усталостного разрушения, в том числе зависимость

от химического состава материала, размеров, формы, состояния поверхности, условий нагружения. Одним из широко используемых материалов для имплантатов является титан и его сплавы за счет ряда преимуществ титана, таких как хорошая биосовместимость, высокая коррозионная стойкость и т. д. Однако усталостные характеристики технически чистого титана не всегда удовлетворяют современным требованиям, а применение легирующих элементов в сплавах может оказывать негативное влияние на организм пациента. Одним из решений данной проблемы является использование технически чистого титана, подвергнутого деформационной упрочняющей обработке. Одним из приемов, приводящих к заметному повышению механических и усталостных свойств металлических материалов, является формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры [1–3]. Эффективным подходом к формированию УМЗ структуры является интенсивная пластическая деформация (ИПД), например равноканальное угловое прессование (РКУП), РКУП-Конформ [4]. Исследования показывают преимущества такого подхода для повышения механических свойств  $T_i$  и ряда титановых сплавов медицинского назначения [2–4]. Так, после РКУП в технически чистом титане формируется структура с размером зерен/субзерен порядка 200 нм, а предел прочности при этом возрастает с 700 до 1100 МПа [4]. Уже разработана технология получения прутков наноструктурного титана на основе производительного метода РКУП-Конформ для медицинского применения и последующей деформации волочением. В полученных прутках зерно измельчается до 100 нм, а предел прочности достигает 1250 МПа [5; 6]. Стоит отметить, что увеличение прочности металлов и сплавов не сопровождается соответствующим ростом сопротивления усталости, а относительное сопротивление усталости у высокопрочных металлов и сплавов, как правило, ниже, чем у среднепрочных сплавов. Для высокопрочных сплавов характерны также большая чувствительность к концентраторам напряжений и параметру шероховатости поверхности, поэтому относительное сопротивление усталости у элементов конструкций из высокопрочных сплавов зачастую ниже, чем у материалов, обладающих средними показателями прочности [7; 8].

Механическая обработка (точение, фрезерование, сверление и т. д.) является неотъемлемой частью технологии изготовления имплантатов. Для механической обработки характерно одновременное разнонаправленное и неоднозначное воздействие на поверхность изделия в виде нагрева, пластической деформации, структурных изменений и др. При этом механическая обработка зависит от большого количества факторов, например режима резания, точности оборудования, жесткости системы, что в результате приводит к появлению на поверхности изделия неравномерных деформаций, остаточных напряжений, существенных микронеровностей, являющихся дополнительными концентраторами напряжений. Сформированные в результате обработки параметры поверхности, такие как шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения, характеризуют ее качество и в конечном итоге – ряд эксплуатационных свойств изделия, в том числе сопротивление усталости и износостойкость [9]. Таким образом, в случае особо ответственных изделий, к которым относятся имплан-

таты, необходимо применять дополнительную финишную обработку поверхности, которая позволит обеспечить заданные параметры и повысить эксплуатационные свойства готовой продукции.

Анализ литературных данных показал, что одним из эффективных подходов к финишной обработке поверхности, позволяющих решить задачу повышения уровня свойств поверхности, являются методы поверхностно-пластического деформирования (ППД), среди которых обдужка дробью, обкатка роликами, ультразвуковая обработка поверхности и др. Обработка методами ППД приводит к интенсивному измельчению структуры до субмикроструктурного и нанокристаллического состояния в поверхностных слоях заготовки. При этом наблюдается градиентное распределение по размеру зерна, с более мелкими зернами ближе к поверхности [10–12].

Среди методов ППД стоит выделить безабразивную ультразвуковую финишную обработку (БУФО). Основной ее задачей является упрочняющая отделочная обработка, в результате которой происходит снижение шероховатости поверхности и ее упрочнение, а также формирование преимущественно сжимающих остаточных напряжений. Процесс БУФО представляет собой импульсно-упрочняющую чистовую обработку с применением ультразвуковых колебаний [13]. Применение ультразвуковых колебаний как основы метода ППД имеет ряд преимуществ перед другими способами ППД, так, согласно [14], в условиях высокочастотного циклического воздействия ультразвуковых колебаний влияние на повышение усталостной прочности при упрочнении поверхности титана определяют не только поверхностные остаточные напряжения и степень пластической деформации, но и особенности структурного состояния обработанной поверхности. Авторы отмечают, что такими особенностями являются повышенная плотность дислокаций, значительные микроискажения, интенсивное торможение различных структурных дефектов, изменение энергетического состояния, фазовые превращения и др. В статье говорится о том, что упрочненный слой ограничивает выход дислокаций на поверхность при циклическом деформировании, обуславливая этим повышение общей энергоемкости материала и, как следствие, рост сопротивления усталости. Авторами работы [14] показано, что применение ультразвуковой финишной обработки ведет к существенному повышению усталостной прочности титана вплоть до 50 %. А градиентное структурное состояние, формирующееся при этом, приводит к повышению ряда эксплуатационных характеристик, например износостойкости [15–17].

К преимуществам метода БУФО также относится возможность обработки на различных металлообрабатывающих станках: токарном, фрезерном и т. д. [18–20].

Анализ литературы показал, что на текущий момент комплексных исследований обработки металлов в УМЗ состоянии методом безабразивной ультразвуковой финишной обработки не существует. Однако, исходя из вышесказанного, исследования в этом направлении довольно актуальны.

Цель работы – исследование влияния различных режимов БУФО на микротвердость и шероховатость цилиндрической заготовки из технически чистого титана марки Grade 4 в УМЗ состоянии.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суть метода БУФО заключается в поверхностном пластическом деформировании обрабатываемой металлической заготовки посредством механических колебаний деформирующего индентора с ультразвуковой частотой. Механические колебания обеспечиваются ультразвуковым генератором, магнитоотрицательным преобразователем и волноводом-концентратором [13].

На рис. 1 представлен комплект оборудования для осуществления метода БУФО – ультразвуковая установка для упрочняюще-чистовой обработки деталей И-4/1-2.0 (ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ», Санкт-Петербург, Россия), которая использовалась в данной работе.

На рис. 2 представлен индентор, использованный в настоящем исследовании. Рабочая часть данного индентора имеет сферическую форму с радиусом закругления  $R=3$  мм и изготовлена из твердого сплава.

Для проведения экспериментальных работ в исследовании была использована заготовка круглого сечения диаметром 9,5 мм из технически чистого титана марки Grade 4 в УМЗ состоянии, полученном методами РКУП-Конформ и волочения. Образцы изготавливались следующим образом: исходный пруток диаметром 12 мм покрывали смазкой, нагревали в печи до  $300\pm 10$  °С, проводили обработку методом РКУП-Конформ (квадратное сечение) при температуре  $300\pm 10$  °С в 6 циклов по маршруту Вс; далее при температуре  $300\pm 10$  °С проводили обработку методом волочения до диаметра 12 мм с накопленной степенью деформации  $\epsilon=0,15$ . На финальном этапе полученный пруток нарезают на мерные штучные заготовки длиной 50 мм с последующей отбочкой на токарном станке до диаметра 9,5 мм.

При обработке методом БУФО используются следующие технологические параметры.

Шаг продольной подачи инструмента и частота/скорость вращения заготовки, определяющие перекрытие между обработанными областями после ударов индентора. В исследовании шаг продольной подачи принят постоянным и равным 0,028 мм/об, рассмотрено 3 варианта частоты вращения: 500, 1000 и 1600 об/мин.

Статическая сила прижатия индентора к обрабатываемой заготовке. В случае приложения чрезмерной силы возможно разрушение поверхностного слоя, что проявляется в ухудшении шероховатости поверхности [29]. Для определения силы прижатия в исследовании ультразвуковой инструмент с помощью специальной оснастки был зажат в резцедержатель токарного станка через пружинный элемент (рис. 3). С помощью электронного безмена было проведено тарирование «сила прижатия – натяг на станке». В работе рассматривали 3 варианта силы прижатия: 25, 50 и 100 Н.

Мощность ультразвукового генератора, определяющая амплитуду механических колебаний индентора, т. е. фактически глубину проработки. Используемый в работе генератор имеет выходную мощность 2 кВт. В исследовании рассматривали 50, 75 и 100 % его мощности.

В рамках проведенной работы рассмотрено 3 варианта предварительной обработки поверхности: непосредственно после резца (чистовое точение), шлифование наждачной бумагой с зернистостью Р600 и Р1000.

На рис. 3 показана установка для БУФО, закрепленная на токарном станке. Охлаждение заготовки в процессе обработки осуществляли с помощью подведения смазывающе-охлаждающей жидкости – смеси машинного масла и воды. Охлаждение магнитоотрицательного преобразователя осуществлялось водой. Рабочая частота генератора – 22 кГц.

Эффективность повышения механических характеристик образцов была оценена по параметрам микротвердости, микроструктуры, глубине проработки (наклепа), шероховатости.

Структурные исследования проводились на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6490LV (JEOL Ltd., Япония) в режиме вторичных электронов.

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере Emco-Test DuraScan-50 (EMCO-TEST PrüfmaSchinen GmbH, Австрия) при нагрузке 100 гр. Величину микротвердости определяли как среднее арифметическое значение по 10 отпечаткам индентора. Определение параметров шероховатости (рис. 4) производили с помощью профилометра TR220 (TIME Group Inc., Китай).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5 изображен образец, полученный в результате обработки методом БУФО в различных режимах.

Анализ микроструктуры образцов в исходном состоянии (рис. 6) показал, что после 6 циклов РКУП-Конформ и последующего волочения средний поперечный размер структурных фрагментов титана марки Grade 4 составил  $180\pm 26$  нм. Микротвердость в исходном состоянии составила  $2590\pm 60$  МПа, шероховатость  $Ra=8,59$ .

Обработка методом БУФО во всех представленных режимах привела к существенному повышению микротвердости поверхности от 2 до 3,5 раз и снижению параметра шероховатости  $Ra$  (таблица 1). Максимальное значение микротвердости достигает  $8930\pm 70$  МПа и наблюдается в режиме № 7. Минимальная шероховатость наблюдается в режиме № 1 и составляет  $Ra=0,25$ .

БУФО в режиме  $P=25$  Н,  $n=1000$  об/мин, шлифование Р1000 привела к увеличению микротвердости относительно исходного состояния в 2 раза до  $5190\pm 50$  МПа, параметр шероховатости при этом снизился до  $Ra=0,25$ . Увеличение силы до 50 Н приводит к дальнейшему увеличению микротвердости до  $7775\pm 65$  МПа, однако и шероховатость при этом имеет большее значение  $Ra=0,38$ . При увеличении силы прижатия до 100 Н процесс обработки стал менее стабильным, микротвердость при этом оказалась на 1500 МПа ниже, чем при 50 Н, однако шероховатость составила  $Ra=0,30$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

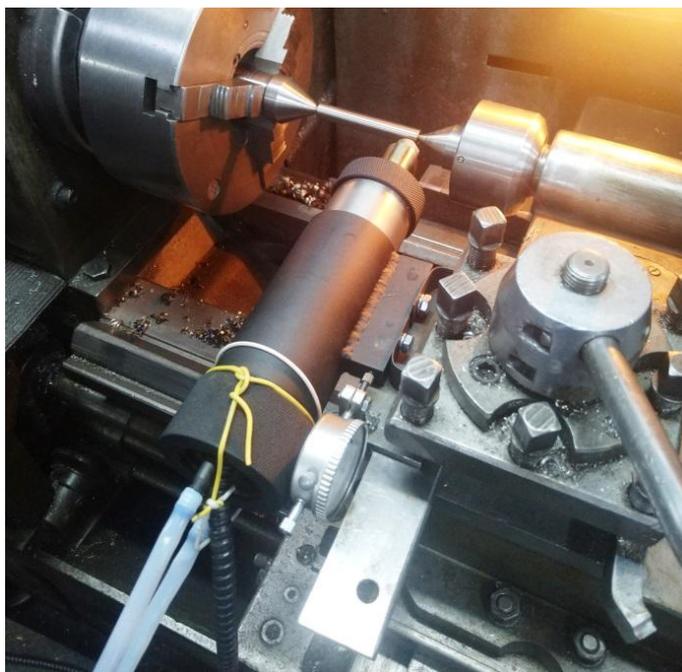
Исследование влияния мощности ультразвукового воздействия показало, что увеличение мощности ведет к линейному увеличению микротвердости, при этом параметр шероховатости становится больше. Это можно связать с тем, что мощность ультразвукового воздействия фактически определяет амплитуду колебаний индентора, т. е. глубину проникновения, и, при недостаточной скорости вращения, в условиях большой амплитуды



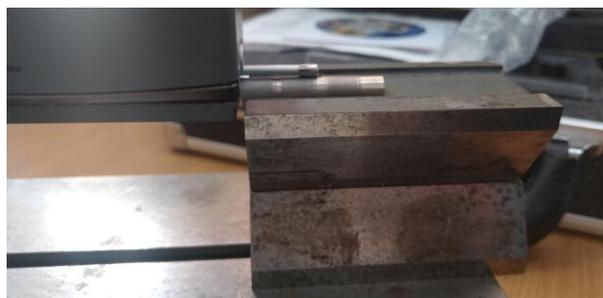
**Рис. 1.** Ультразвуковая установка для упрочняюще-чистовой обработки деталей И-4/1-2.0  
**Fig. 1.** I-4/1-2.0 ultrasonic device for hardening and finishing of parts



**Рис. 2.** Деформирующий индентор.  
Радиус закругления  $R=3$  мм  
**Fig. 2.** Deforming indenter. Rounded radius  $R=3$  mm



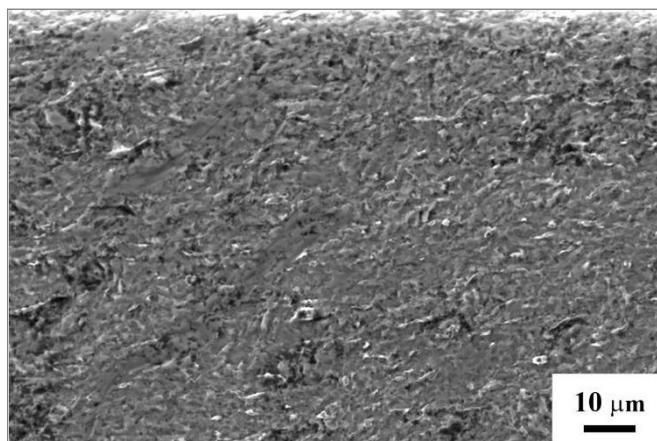
**Рис. 3.** Оборудование для БУФО, установленное на токарном станке  
**Fig. 3.** The equipment for abrasive-free ultrasonic finishing (AFUF) installed on a lathe



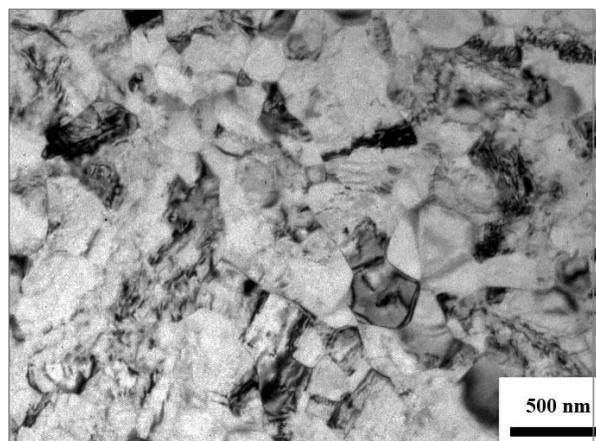
**Рис. 4.** Измерение шероховатости образца  
**Fig. 4.** Sample roughness measurement



**Рис. 5.** Образец, обработанный БУФО в различных режимах  
**Fig. 5.** Sample processed under various AFUF modes



*a*



*b*

**Рис. 6.** Микроструктура титана марки Grade 4 после 6 циклов РКВП-Конформ и волочения до  $\varnothing$  12 мм ( $\epsilon=0,15$ ):  
*a* – РЭМ; *b* – ПЭМ

**Fig. 6.** Grade 4 titanium microstructure after six ECAP-Conform cycles and drawing to  $\varnothing$  12 mm ( $\epsilon=0,15$ ):  
*a* – SEM; *b* – TEM

происходит наложение ударов друг на друга, что ведет к образованию более высоких микронеровностей, чем в случае небольшой амплитуды. О таком влиянии скорости вращения свидетельствует проведенный далее эксперимент, который показал, что с увеличением скорости вращения параметр шероховатости имеет тенденцию к снижению. Так, при увеличении скорости вращения с 500 до 1600 об/мин при прочих равных ус-

ловиях значение параметра шероховатости  $Ra$  снизилось с 0,42 до 0,36, а микротвердость при этом увеличивалась.

Влияние предварительной обработки поверхности шлифованием на ее микротвердость и шероховатость неоднозначно. Для шероховатости разницы между шлифованными и нешлифованными образцами не наблюдается. Микротвердость образца после реза

Таблица 1. Режимы БУФО и значения микротвердости и шероховатости Ra  
 Table 1. AFUF modes and values of microhardness and roughness Ra

Режим, №	Сила прижатия P, Н	Мощность, %	Частота вращения, об/мин	Шлифование, маркировка шлифовальной бумаги	Микротвердость HV0,01/15, МПа	Шероховатость Ra, мкм
И. с.				Точение	2590	8,59
1	25	100	1000	P1000	5190	0,25
2	50	100	1000	P1000	7775	0,38
3	100	100	1000	P1000	6280	0,31
4	50	50	1000	P1000	5730	0,29
5	50	75	1000	P1000	6830	0,28
2	50	100	1000	P1000	7775	0,38
6	50	100	500	P1000	5490	0,42
2	50	100	1000	P1000	7775	0,38
7	50	100	1600	P1000	8930	0,36
8	50	100	1000	Точение	8230	0,42
9	50	100	1000	P600	6310	0,42
2	50	100	1000	P1000	7775	0,38

Примечание: И. с. – исходное состояние.

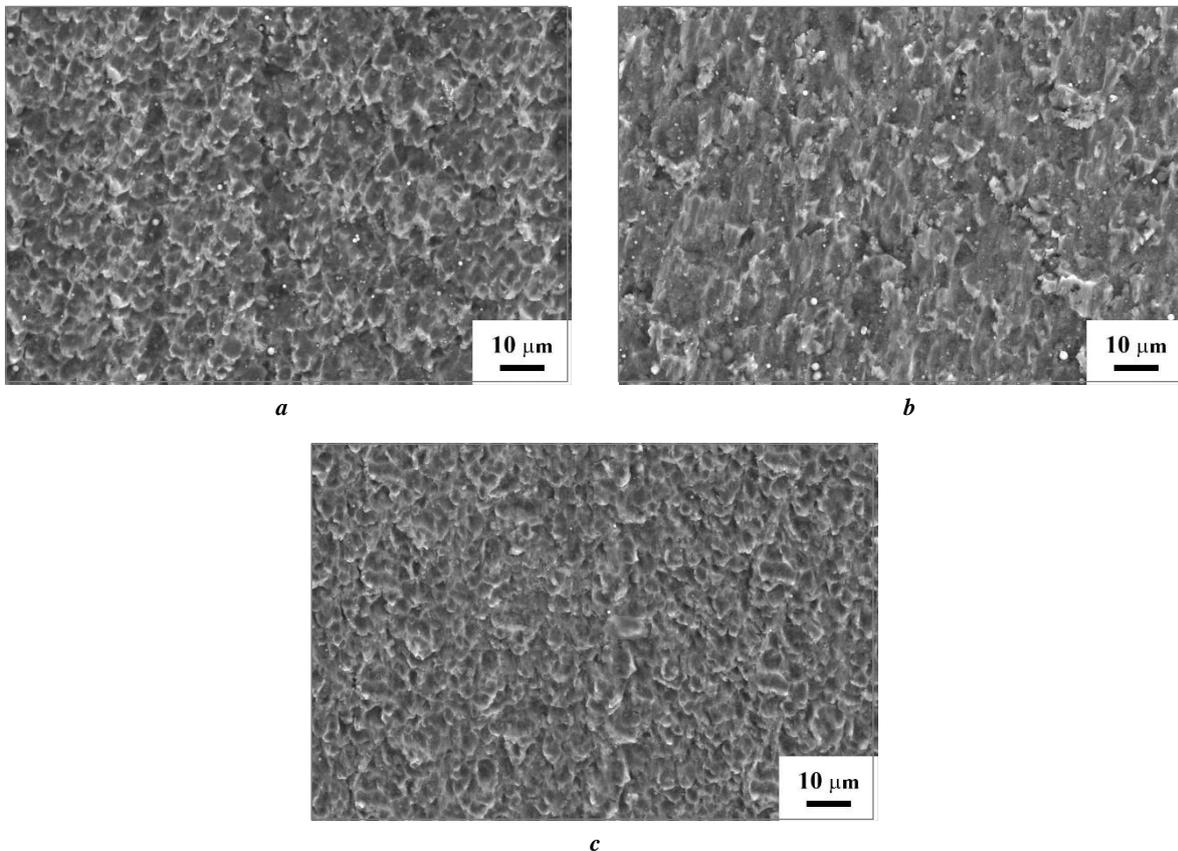


Рис. 7. Изображение поверхности упрочненного слоя (РЭМ), полученного по режимам: а – № 2; б – № 7; с – № 8  
 Fig. 7. An image of a hardened layer surface (SEM) obtained by the modes: a – No. 2; b – No. 7; c – No. 8

и после шлифования наждачной бумагой P1000 практически равна, а после наждачной бумаги P600 – ниже примерно на 2000 МПа.

Исследование микроструктуры поверхности образцов с максимальными значениями микротвердости (полученной по режимам № 2, 7 и 8) методом РЭМ (рис. 7) позволило установить, что обработка по предложенным режимам ведет к формированию поверхности в виде фрагментов с размером от 3 до 5 мкм. При этом в состоянии с максимальной микротвердостью (режим № 7) фрагменты имеют более вытянутую форму, что может объясняться более высокой скоростью вращения заготовки.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках проведенного исследования изучено влияние технологических параметров БУФО на шероховатость и микротвердость образцов из технически чистого титана марки Grade 4 в УМЗ состоянии.

Установлено, что обработка технически чистого титана в УМЗ состоянии методом БУФО приводит к существенному повышению микротвердости поверхности от 2 до 3,5 раз и снижению ее шероховатости. Максимальное значение микротвердости достигает  $8930 \pm 70$  МПа и наблюдается в режиме № 7. Минимальная шероховатость наблюдается в режиме № 1 и составляет  $Ra=0,25$ .

Выявлено, что увеличение мощности ведет к линейному увеличению микротвердости, при этом параметр шероховатости в выбранных режимах становится больше. С увеличением скорости вращения заготовки параметр шероховатости имеет тенденцию к снижению, а микротвердость при этом возрастает.

Исследование микроструктуры поверхностного слоя образцов позволило установить, что обработка по предложенным режимам ведет к формированию поверхности в виде фрагментов размером от 3 до 5 мкм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kang J.-H., Ko Y.G. Microstructure and mechanical properties of ultrafine grained 5052 Al alloy fabricated by multi-pass differential speed rolling // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 19. P. 2031–2049. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.05.196](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.196).
- Mao Q., Liu Ya., Zhao Y. A review on mechanical properties and microstructure of ultrafine grained metals and alloys processed by rotary swaging // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 896. Article number 163122. DOI: [10.1016/j.jallcom.2021.163122](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163122).
- Naseri R., Hiradfar H., Shariati M., Kadkhodayan M. A comparison of axial fatigue strength of coarse and ultrafine grain commercially pure titanium produced by ECAP // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18. № 3. P. 755–767. DOI: [10.1016/j.acme.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.12.005).
- Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications. New Jersey: Wiley, 2013. 440 P. DOI: [10.1002/9781118742679](https://doi.org/10.1002/9781118742679).
- Stolyarov V.V., Valiev R.Z., Zhu Y.T., Lowe T.C. Microstructure and properties of pure Ti processed by ECAP and cold extrusion // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. Vol. 303. № 1-2. P. 82–89. DOI: [10.1016/S0921-5093\(00\)01884-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01884-0).
- Raab G.I., Valiev R.Z., Gunderov D.V., Lowe T.C., Misra A., Zhu Y.T. Long-length ultrafine-grained titanium rods produced by ECAP- conform // *Materials Science Forum*. 2008. Vol. 584-586 PART 1. P. 80–85. DOI: [10.4028/www.scientific.net/msf.584-586.80](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.584-586.80).
- Fintová S., Arzaghi M., Kuběna I., Kunz L., Sarrazin-Baudoux C. Fatigue crack propagation in UFG Ti grade 4 processed by severe plastic deformation // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 98. P. 187–194. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.01.028](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.028).
- Жернаков В.С., Семенова И.П., Ермоленко А.Н. Влияние наряду деформированного состояния деталей из объемных наноматериалов на усталостную прочность // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2009. Т. 12. № 2. С. 62–68. EDN: [KXGYON](https://www.edn.ru/kxgyon/).
- Урядов С.А. Повышение сопротивления усталости деталей технологическими методами // *Известия МГТУ МАМИ*. 2014. Т. 2. № 1. С. 176–179. EDN: [SMMVKL](https://www.edn.ru/smmvkl/).
- Федчишин О.В., Трофимов В.В., Клименов В.А. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и Физико-механические свойства титана BT 1-0 // *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. 2009. Т. 89. № 6. С. 189–192. EDN: [JYVAVF](https://www.edn.ru/jvyavf/).
- Zhang H., Chiang R., Qin H.F., Ren Z.C., Hou X.N., Lin D., Doll G.L., Vasudevan V.K., Dong Y.L., Ye C. The effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue performance of 3D-printed Ti64 // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 103. P. 136–146. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.05.019](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.05.019).
- Liu J., Ren Z., Dong Y., Ye C., Suslov S. Microstructure evolution in Ti64 subjected to laser-assisted ultrasonic nanocrystal surface modification // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019. Vol. 136. P. 19–33. DOI: [10.1016/j.ijmactools.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2018.09.005).
- Холопов Ю.В. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов – технология XXI века // *Металлообработка*. 2001. № 4. С. 16–20. EDN: [IAFOAR](https://www.edn.ru/iafoar/).
- Александров М.К., Папшева Н.Д., Акушская О.М. Ультразвуковое упрочнение деталей ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королёва (Национального исследовательского университета)*. 2011. № 3-1. С. 271–276. EDN: [OWXWDZ](https://www.edn.ru/owxwdz/).
- Козлов Э.В., Громов В.Е., Коваленко В.В., Попова Н.А. Градиентные структуры в перлитной стали. Новокузнецк: СибГИУ, 2004. 200 с.
- Иванов Ю.Ф., Ефимов О.Ю., Попова Н.А., Коваленко В.В., Коновалов С.В., Громов В.Е., Козлов Э.В. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний на наномасштабном уровне в прокатных валках // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2008. Т. 5. № 4. С. 55–58. EDN: [KTMLNJ](https://www.edn.ru/ktmlnj/).
- Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients: Microstructures that increase metal crystallite size from nanoscale with surface depth are both strong and

- ductile // *Science*. 2014. Vol. 345. № 6203. P. 1455–1456. DOI: [10.1126/science.1255940](https://doi.org/10.1126/science.1255940).
18. Müller M., Lebedev A., Svobodová J., Náprsková N., Lebedev P. Abrasive-free ultrasonic finishing of metals // *Manufacturing technology*. 2014. Vol. 14. № 3. P. 366–370.
  19. Aleš Z., Pavlů J., Hromasová M., Svobodová J. Tribological properties of brass surfaces machined by abrasive - free ultrasonic finishing process // *Manufacturing technology*. 2019. Vol. 19. № 1. P. 3–8. DOI: [10.21062/UJEP/235.2019/A/1213-2489/MT/19/1/3](https://doi.org/10.21062/UJEP/235.2019/A/1213-2489/MT/19/1/3).
  20. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Каминский П.П., Шаркеев Ю.П., Лотков А.И. Ультразвуковая поверхностная обработка – перспективный способ повышения ресурса работы деталей железнодорожного транспорта // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2010. Т. 152. № 10. С. 117–121.
  21. Богуслав В.А., Вишнепольский Е.В., Пухальская Г.В., Гликсон И.Л. Повышение сопротивления усталости тонкостенных валов // *Вісник двигунобудування*. 2007. № 2. С. 136–141.
- REFERENCES**
1. Kang J.-H., Ko Y.G. Microstructure and mechanical properties of ultrafine grained 5052 Al alloy fabricated by multi-pass differential speed rolling. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, Vol. 19, pp. 2031–2049. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.05.196](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.196).
  2. Mao Q., Liu Ya., Zhao Y. A review on mechanical properties and microstructure of ultrafine grained metals and alloys processed by rotary swaging. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, Vol. 896, article number 163122. DOI: [10.1016/j.jallcom.2021.163122](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163122).
  3. Naseri R., Hiradfar H., Shariati M., Kadkhodayan M. A comparison of axial fatigue strength of coarse and ultrafine grain commercially pure titanium produced by ECAP. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, Vol. 18, no. 3, pp. 755–767. DOI: [10.1016/j.acme.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.12.005).
  4. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. *Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications*. New Jersey, Wiley Publ., 2013. 440 P. DOI: [10.1002/9781118742679](https://doi.org/10.1002/9781118742679).
  5. Stolyarov V.V., Valiev R.Z., Zhu Y.T., Lowe T.C. Microstructure and properties of pure Ti processed by ECAP and cold extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, Vol. 303, no. 1-2, pp. 82–89. DOI: [10.1016/S0921-5093\(00\)01884-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01884-0).
  6. Raab G.I., Valiev R.Z., Gunderov D.V., Lowe T.C., Misra A., Zhu Y.T. Long-length ultrafine-grained titanium rods produced by ECAP-conform. *Materials Science Forum*, 2008, Vol. 584-586 PART 1, pp. 80–85. DOI: [10.4028/www.scientific.net/msf.584-586.80](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.584-586.80).
  7. Fintová S., Arzaghi M., Kuběna I., Kunz L., Sarrazin-Baudoux C. Fatigue crack propagation in UFG Ti grade 4 processed by severe plastic deformation. *International Journal of Fatigue*, 2017, Vol. 98, pp. 187–194. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.01.028](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.028).
  8. Zhernakov V.S., Semenova I.P., Ermolenko A.N. Influence of the stress strain behavior condition of details from volume nanomaterials on fatigue strength. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, Vol. 12, no. 2, pp. 62–68. EDN: [XKGYOH](https://elibrary.ru/xkgyoh).
  9. Uryadov S.A. Improvement of fatigue resistance of parts using technological methods. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2014, Vol. 2, no. 1, pp. 176–179. EDN: [SMMVKL](https://elibrary.ru/smmvkl).
  10. Fedchishin O.V., Trofimov V.V., Klimenov V.A. Influence of ultrasonic processing on structure and physicomechanical properties of titan BT 1-0. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal (Irkutsk)*, 2009, Vol. 89, no. 6, pp. 189–192. EDN: [JVYAVE](https://elibrary.ru/jvyave).
  11. Zhang H., Chiang R., Qin H.F., Ren Z.C., Hou X.N., Lin D., Doll G.L., Vasudevan V.K., Dong Y.L., Ye C. The effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue performance of 3D-printed Ti64. *International Journal of Fatigue*, 2017, Vol. 103, pp. 136–146. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.05.019](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.05.019).
  12. Liu J., Ren Z., Dong Y., Ye C., Suslov S. Microstructure evolution in Ti64 subjected to laser-assisted ultrasonic nanocrystal surface modification. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, Vol. 136, pp. 19–33. DOI: [10.1016/j.ijmactools.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2018.09.005).
  13. Kholopov Yu.V. Abrasive-free ultrasonic finishing of metals – the technology of the XXI century. *Metalloobrabotka*, 2001, no. 4, pp. 16–20. EDN: [IAFOAR](https://elibrary.ru/iafoar).
  14. Aleksandrov M.K., Papsheva N.D., Akushskaya O.M. Ultrasonic hardening of parts GTE. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika S.P. Koroleva (Natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2011, no. 3-1, pp. 271–276. EDN: [OWXWDZ](https://elibrary.ru/owxwdz).
  15. Kozlov E.V., Gromov V.E., Kovalenko V.V., Popova N.A. *Gradientnye struktury v perlitnoy stali* [Gradient structures in pearlitic steel]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2004. 200 p.
  16. Ivanov Yu.F., Efimov O.Yu., Popova N.A., Kovalenko V.V., Konovalov S.V., Gromov V.E., Kozlov E.V. Formation of Gradient Structural-Phase States at the Nanoscale Level in Rolls. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2008, Vol. 5, no. 4, pp. 55–58. EDN: [KTMLNJ](https://elibrary.ru/ktmlnj).
  17. Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients: Microstructures that increase metal crystallite size from nanoscale with surface depth are both strong and ductile. *Science*, 2014, Vol. 345, no. 6203, pp. 1455–1456. DOI: [10.1126/science.1255940](https://doi.org/10.1126/science.1255940).
  18. Müller M., Lebedev A., Svobodová J., Náprsková N., Lebedev P. Abrasive-free ultrasonic finishing of metals. *Manufacturing technology*, 2014, Vol. 14, no. 3, pp. 366–370.
  19. Aleš Z., Pavlů J., Hromasová M., Svobodová J. Tribological properties of brass surfaces machined by abrasive - free ultrasonic finishing process. *Manufacturing technology*, 2019, Vol. 19, no. 1, pp. 3–8. DOI: [10.21062/UJEP/235.2019/A/1213-2489/MT/19/1/3](https://doi.org/10.21062/UJEP/235.2019/A/1213-2489/MT/19/1/3).
  20. Klimenov V.A., Kovalevskaya Zh.G., Kaminskiy P.P., Sharkeev Yu.P., Lotkov A.I. Ultrasonic surface treatment – a promising way to increase the service life of railway transport parts. *Visnik Skhidnoukrajinskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya*, 2010, Vol. 152, no. 10, pp. 117–121.

21. Boguslaev V.A., Vishnepolskiy E.V., Pukhalskaya G.V., Glikson I.L. Increasing the fatigue resistance of thin-walled shafts. *Visnik dvigunobuduvannya*, 2007, no. 2, pp. 136–141.

## Roughness and microhardness of UFG Grade 4 titanium under abrasive-free ultrasonic finishing

© 2022

**Rashid N. Asfandiyarov**\*<sup>1,2,4</sup>, PhD (Engineering), researcher, assistant professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals  
**Georgy I. Raab**<sup>3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), leading researcher  
**Dmitry V. Gunderov**<sup>1,2,5</sup>, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), leading researcher of the Institute of Physics of Molecules and Crystals, professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals  
**Denis A. Aksenov**<sup>1,2,6</sup>, junior researcher  
**Arseniy G. Raab**<sup>2</sup>, PhD (Engineering), researcher  
**Sofia D. Gunderova**<sup>2</sup>, student  
**Mariya A. Shishkunova**<sup>2</sup>, graduate student

<sup>1</sup>*Institute of Physics of Molecules and Crystals of Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa (Russia)*

<sup>2</sup>*Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)*

<sup>3</sup>*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk (Russia)*

\*E-mail: a.r.n@list.ru

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5522-4314>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5925-4513>

<sup>6</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2652-2646>

Received 28.04.2022

Accepted 16.08.2022

**Abstract:** Increasing the fatigue resistance of implants is an important scientific and technical problem. One of the solutions to this problem is the high-strength state formation due to the ultrafine-grained (UFG) structure. However, high-strength alloys are characterized by greater sensitivity to stress concentrators and the surface roughness parameter. In turn, implant designs, as a rule, imply the presence of concentrators in the form of various grooves, threaded elements, etc., and the manufacturing technology supposes mechanical processing with an ambiguous effect on a finished product surface. The application of additional surface finishing, for example, abrasive-free ultrasonic finishing (AFUF), is a solution to this problem. This work aims to study the effect of different AFUF modes on the microhardness and roughness of a cylindrical blank made of Grade 4 commercially pure titanium in the UFG state. During the study, the authors assessed the effect of the rotation frequency of a workpiece and the static force of pressing the tool against the processed workpiece on the surface parameters; carried out microstructural studies of the obtained samples. The results showed that processing titanium in the UFG state by the AFUF method leads to a significant increase in the surface microhardness and a decrease in its roughness. For example, depending on the mode, the increase in microhardness can reach from 2 to 3.5 times. The authors investigated the effect of a power level of ultrasonic treatment on roughness and microhardness and considered various variants of surface pretreatment. The study identified that an increase in the speed of rotation of a workpiece reduces the roughness of a machined workpiece, while the microhardness increases.

**Keywords:** abrasive-free ultrasonic finishing; UFG; Grade 4 titanium ultrafine-grained structure; roughness; microhardness.

**Acknowledgements:** The study was supported by the grant No. 21-79-00124 of the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/21-79-00124/>.

**For citation:** Asfandiyarov R.N., Raab G.I., Gunderov D.V., Aksenov D.A., Raab A.G., Gunderova S.D., Shishkunova M.A. Roughness and microhardness of UFG Grade 4 titanium under abrasive-free ultrasonic finishing. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 3, pp. 41–49. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-41-49.