

## Ударная вязкость титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой, полученной методом равноканального углового прессования

© 2022

*Модина Юлия Михайловна*<sup>\*1</sup>, кандидат технических наук, младший научный сотрудник  
*Дьяконов Григорий Сергеевич*<sup>2</sup>, кандидат технических наук, научный сотрудник  
*Стоцкий Андрей Геннадиевич*<sup>3</sup>, младший научный сотрудник  
*Мифтахов Данил Тимурович*, оператор электронно-вычислительных и вычислительных машин  
*Семенова Ирина Петровна*<sup>4</sup>, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник  
*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)*

\*E-mail: modina\_yulia@mail.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7836-3990>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5389-5547>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2667-1115>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1857-9909>

Поступила в редакцию 04.05.2022

Принята к публикации 13.07.2022

**Аннотация:** Широкое использование двухфазных титановых сплавов в авиадвигателестроении, а также стремительное развитие данной отрасли подразумевают всё более жесткие требования к конструкционным материалам и увеличению их надежности, прочностных и эксплуатационных свойств. Формирование ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния в металлах и сплавах методами интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет достичь высоких прочностных показателей. Однако важным аспектом УМЗ материалов является их структурный и текстурный эффект, который может привести к сильной анизотропии их свойств. В связи с этим в работе исследовано влияние микроструктурных особенностей на механические свойства и ударную вязкость сплава ВТ6 после равноканального углового прессования (РКУП) и последующей деформации осадкой, имитирующей штамповку. Показано, что формирование УМЗ состояния в титановом сплаве ВТ6 с размером зерен около 0,4 мкм позволяет повысить предел прочности до 1250 МПа. Дополнительная осадка УМЗ сплава при  $T=750$  °С приводит к увеличению зерен до 0,5–1 мкм и снижению прочности до 1090 МПа в результате процессов возврата и рекристаллизации. Проведены испытания на ударную вязкость с концентратором V-типа при комнатной температуре, показано, что ударная вязкость УМЗ сплава ВТ6 составила 0,41 МДж/м<sup>2</sup>. Обнаружена анизотропия ударной вязкости в УМЗ сплаве ВТ6 после РКУП и дополнительной осадки ввиду металлографической и кристаллографической текстуры, сформированной в результате деформационной обработки. В направлении испытания № 1 значение ударной вязкости наименьшее и составляет 0,31 МДж/м<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** титановые сплавы; ВТ6; интенсивная пластическая деформация; ультрамелкозернистая структура; металлографическая и кристаллографическая текстура деформации; механические свойства; ударная вязкость.

**Благодарности:** Микроструктурные исследования и испытания на ударную вязкость выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-79-10167. Механические испытания на растяжение выполнены за счет средств гранта в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых (НОЦ-ГМУ-2021). Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УГАТУ».

**Для цитирования:** Модина Ю.М., Дьяконов Г.С., Стоцкий А.Г., Мифтахов Д.Т., Семенова И.П. Ударная вязкость титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой, полученной методом равноканального углового прессования // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 3. С. 7–15. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-2-7-15.

### ВВЕДЕНИЕ

Такие ответственные изделия, как лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), работают в достаточно агрессивных условиях, в частности в условиях повышенных нагрузок в сочетании с термическим воздействием. Эти детали изготавливают из титановых сплавов, поскольку высокая удельная прочность в сочетании с жаропрочностью в необходимом диапазоне делают их особенно важными для авиации. Титановый сплав ВТ6 имеет широкое применение в авиастроении, и его значимость как конструкционного материала для данной отрасли остается высокой.

При создании все более мощных газотурбинных установок возникает необходимость модифицировать материал изделий. С одной стороны, разработка новых композиций сплавов требует больших затрат с точки зрения апробации сплава, проведения испытаний для аттестации его эксплуатационных свойств; с другой стороны, используемые классические методы деформационно-термических обработок (ДТО) для повышения механических свойств практически исчерпали свой потенциал. В отличие от стандартных ДТО, методы интенсивной пластической деформации (ИПД) показывают несравненно более высокие механические характеристики для многих материалов [1–3]. При ИПД наблюдается

не просто процесс измельчения структуры, а воздействие на фазовые и структурные составляющие, что приводит к более существенному повышению механических свойств [4; 5]. В этой связи ультрамелкозернистые (УМЗ) и наноструктурные (НС) материалы, получаемые методами ИПД и с использованием методов ИПД, вызывают большой интерес у исследователей.

Известно, что формирование УМЗ состояний в металлах и сплавах сопровождается структурно-фазовыми преобразованиями [6; 7] и изменением кристаллографической текстуры [8–10], от которых, в свою очередь, зависит комплекс механических свойств. Например, текстурированный материал вызывает сильную анизотропию механических свойств [11–13], что может негативно сказаться и на одной из важнейших характеристик конструкционных материалов – вязкости разрушения, которая отражает способность материала сопротивляться хрупкому разрушению и является структурно зависимой величиной [14].

Как правило, создание готового изделия требует нескольких технологических операций. Часто одной из последних операций, влияющей на структуру и механические свойства, является штамповка, которая проходит при относительно высоких температурах [15; 16]. Процесс формообразования УМЗ материалов показывает более высокую технологичность за счет проявления эффекта сверхпластичности и возможности понижения температуры штамповки [17; 18]. В связи с этим важной задачей является управление структурно-фазовым и текстурным состоянием УМЗ материала на каждом этапе формообразования с целью сохранения комплекса повышенных механических характеристик в конечном изделии.

Цель работы – исследование ударной вязкости и прочности титанового сплава ВТ6 в ультрамелкозернистом состоянии после равноканального углового прессования и дополнительной деформационно-термической обработки в виде осадки.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовался двухфазный титановый сплав ВТ6, полученный в горячекатаном состоянии, диаметром 20 мм. Исходный сплав в горячекатаном состоянии подвергался предварительной термической обработке (ТО) по следующему режиму: закалка в воду при температуре 960 °С, отжиг в течение 4 ч при температуре 675 °С с охлаждением на воздухе.

УМЗ состояние в заготовках ВТ6 формировали методом ИПД равноканальным угловым прессованием (РКУП) по режиму: 4 прохода по маршруту С при температуре 700 °С с углом пересечения каналов 120° ( $\epsilon=2,8$ ). Для имитации процесса формообразования деталей ГТД методом штамповки УМЗ заготовки подвергли ДТО, включающей в себя нагрев заготовки до  $T=750$  °С длительностью 30 мин, осадку ( $\epsilon=30$  %) при температуре 750 °С и охлаждение заготовки на воздухе.

Электронно-микроскопические исследования образцов (рис. 1) были проведены на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6390 при ускоряющем напряжении 20 кэВ и на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOL JEM 2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Механические испытания на растяжение малых плоских образцов (рис. 1) с рабочим сечением 0,5×1,0 мм и расчетной длиной 4 мм были проведены при комнатной температуре со скоростью  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> на универсальной испытательной машине Instron 5982.

Испытания на ударную вязкость стандартных образцов размером 10×10×55 мм, вырезанных в продольном сечении заготовок после РКУП и РКУП+осадка, с концентратором напряжений V-типа были проведены при комнатной температуре на копре с падающим грузом Instron CEAST 9350 с погрешностью измерения 2 %. Для каждого состояния и направления испытывали по три образца, в результатах отражен разброс экспериментальных данных.

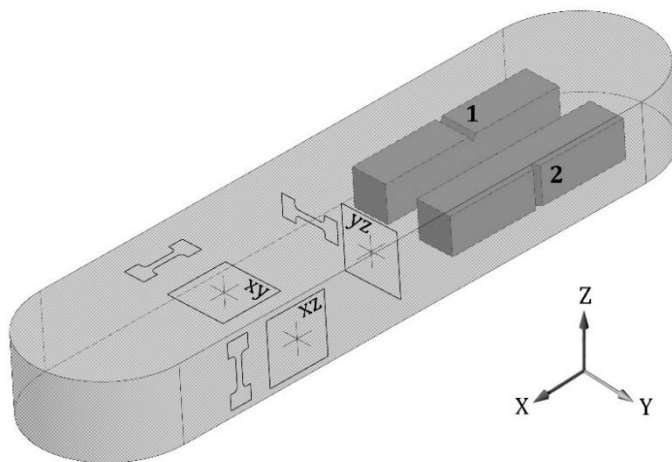


Рис. 1. Схема вырезки образцов на микроструктурные исследования (квадрат) и механические испытания на растяжение (гантель)

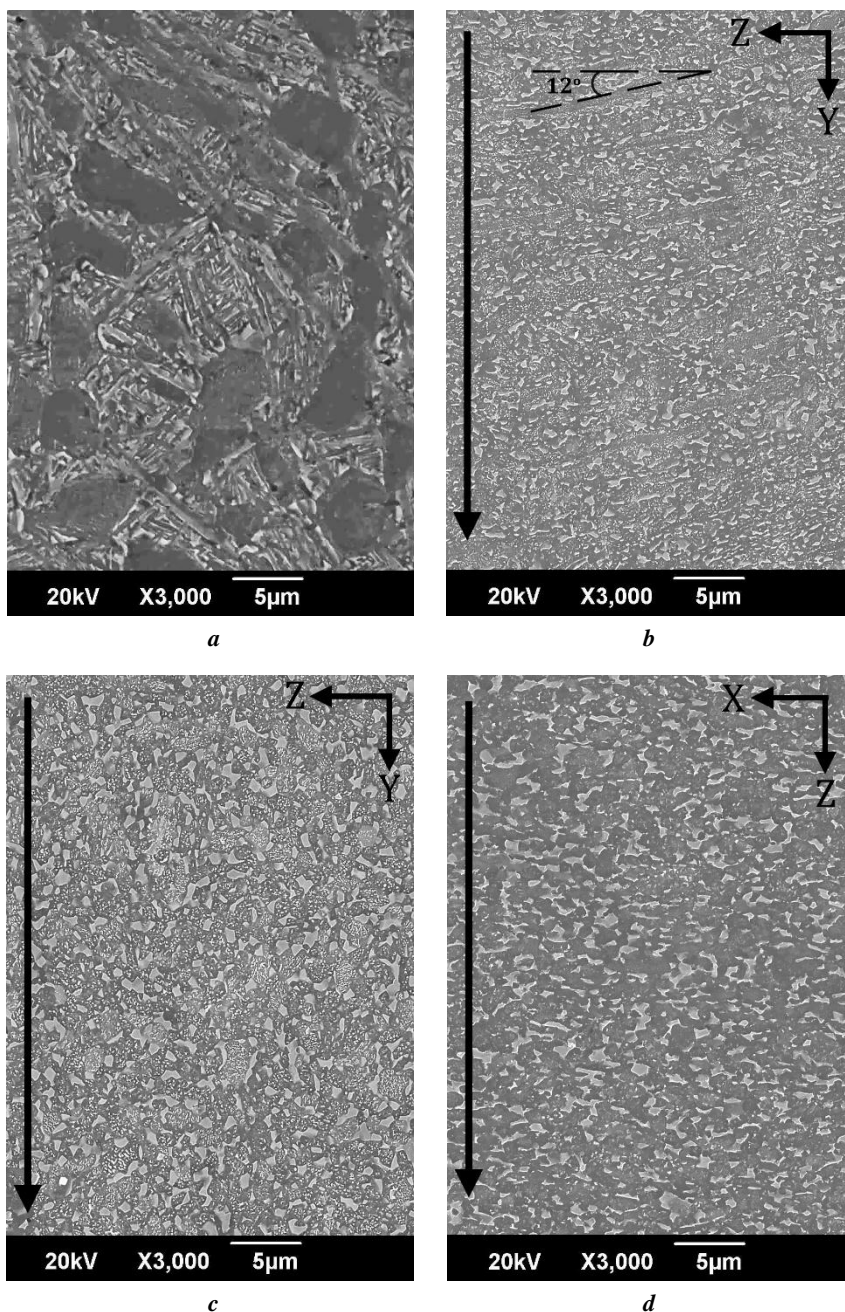
Fig. 1. The scheme of specimen cutoff for microstructure tests (box) and mechanical tension tests (dumb-bell shaped figure)

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сплав после термической обработки характеризовался крупнозернистой глобулярно-пластинчатой структурой (рис. 2 а). Первичные  $\alpha$ -глобули имеют средний размер около 4 мкм, объемная доля первичных  $\alpha$ -глобулей составляет ~50 %. Пластинчатая составляющая сплава представлена чередующимися пластинами  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы.

После РКУП и РКУП+осадка микроструктура сплава ВТ6 была проанализирована в поперечном сечении –

YZ (рис. 2 б, 2 с). Микроструктура после РКУП характеризовалась остаточной первичной  $\alpha$ -фазой, окруженной смесью деформированных  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, размер которых составляет 0,4 мкм. Заметно, что в плоскости YZ первичная  $\alpha$ -фаза вытянута под углом примерно  $12^\circ$  по отношению к оси z (рис. 2 б). Большая часть пластинчатой  $\alpha+\beta$  составляющей преобразовалась в частицы равноосной формы. Согласно результатам просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) после РКУП деформации



**Рис. 2.** Микроструктура сплава ВТ6:  
*a* – после термической обработки; *b* – после деформации методом РКУП, плоскость YZ;  
*c* – после РКУП+осадка, плоскость YZ; *d* – РКУП+осадка, плоскость XZ.  
 Стрелкой обозначено направление развития трещины при испытаниях KCV

**Fig. 2.** VT6 alloy microstructure:  
*a* – after heat treatment; *b* – after ECAP deformation, YZ plane;  
*c* – after ECAP+upset, YZ plane; *d* – ECAP+upset, XZ plane.  
 An arrow indicates the direction of crack development during KCV tests

формируется ультрамелкозернистая структура со средним размером зерен/субзерен 0,4 мкм (рис. 3 а). Большое количество зерен и субзерен имеют четко различимые границы. Характерная точечная дифракция указывает на преимущественно высокоугловую разориентировку зеренной структуры (рис. 3 а).

После дополнительной деформации осадкой после РКУП размер частиц увеличился до 0,5–1 мкм (рис. 2 с, 2 d). Зерна первичной  $\alpha$ -фазы вытянутой формы, наблюдавшиеся в микроструктуре после РКУП, потеряли свою целостность и стали больше не различимы в микроструктуре сплава после осадки. Исследование методом ПЭМ микроструктуры сплава после осадки также указывает на развитие процессов рекристаллизации и роста зерен до 1 мкм (рис. 3 b). Внутри таких зерен наблюдаются дислокационные скопления и вновь образующиеся границы фрагментов. Наличие характерных тяжей на картине дифракции указывает на формирование малоугловых разориентировок (рис. 3 b).

Результаты механических испытаний на растяжение титанового сплава ВТ6 в различных структурных состояниях приведены в таблице 1.

Предел прочности ( $\sigma_B$ ) титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии составлял 990 МПа, формирование УМЗ состоянием методом РКУП позволило повысить значение до 1250 МПа с уменьшением пластичности до 4,5 %. Дополнительная деформация осадкой снижает прочность до 1079 МПа в плоскости ХZ и до 1089 МПа в плоскости YZ с увеличением общего ( $\delta$ ) и равномерного удлинения ( $\delta_p$ ) до 12,2 и 1,1 % соответственно, однако прочностные показатели выше, чем в крупнозернистом (КЗ) состоянии.

В таблице 2 представлены результаты испытаний на ударную вязкость (KCV) титанового сплава ВТ6 в различных структурных состояниях и направлениях испытаний.

Значение ударной вязкости титанового сплава ВТ6 в крупнозернистом состоянии составляло 0,48 МДж/м<sup>2</sup>,

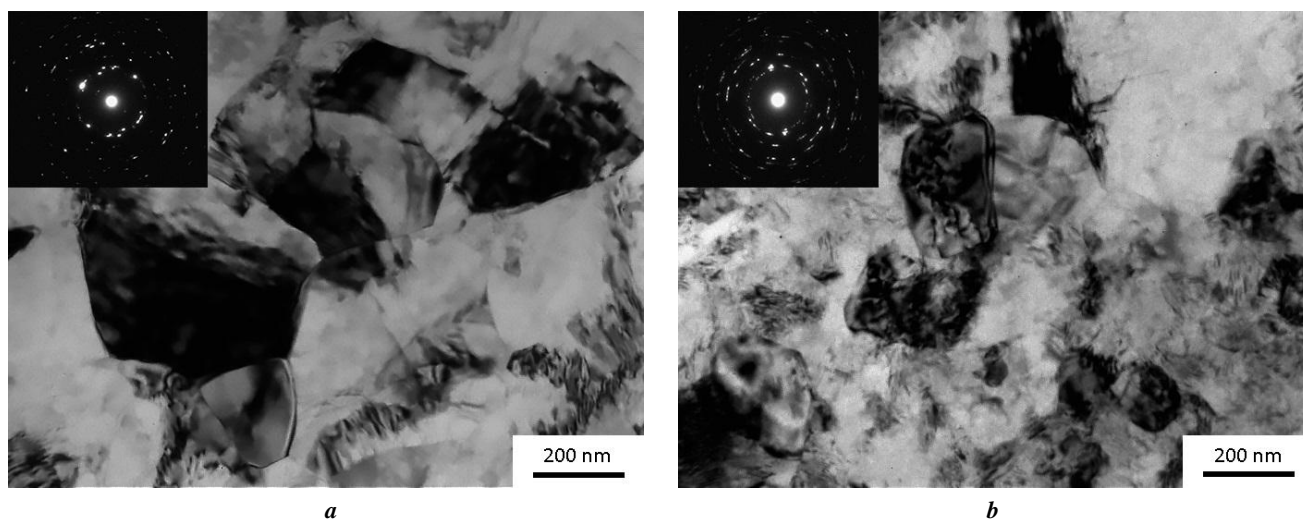


Рис. 3. Микроструктура в ПЭМ титанового сплава ВТ6 после: а – РКУП; б – РКУП+осадка (поперечное сечение – yz)  
 Fig. 3. VT6 titanium alloy microstructure in TEM after: a – ECAP; b – ECAP+upset (cross section – yz)

Таблица 1. Механические свойства титанового сплава ВТ6 в различных состояниях  
 Table 1. Mechanical properties of VT6 titanium alloy in different states

Состояние (плоскость)	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\delta_p$ , %
Крупнозернистое	990±20	920±20	13,0±1,0	4,5±0,5
УМЗ РКУП (YZ)	1250±25	1220±36	4,5±1,3	0,6±0,1
УМЗ (РКУП+осадка (ХZ))	1079±9	1039±15	12,2±1,5	1,1±0,3
УМЗ (РКУП+осадка (YZ))	1089±21	1066±27	9,0±0,1	0,7±0,2

Таблица 2. Ударная вязкость титанового сплава ВТ6 в различных состояниях  
Table 2. Impact strength of VT6 titanium alloy in different states

Состояние (направление)	KCV, МДж/м <sup>2</sup>	A, Дж	A <sub>z</sub> , Дж	A <sub>p</sub> , Дж
Крупнозернистое	0,48±0,02	38,4±0,9	14,4±1,0	24,0±0,8
УМЗ РКУП (YZ)	0,41±0,01	31,4±0,3	27,2±1,6	4,2±1,4
УМЗ РКУП+осадка (№ 1)	0,31±0,03	25,4±2,8	19,5±1,0	5,9±2,9
УМЗ РКУП+осадка (№ 2)	0,40±0,07	32,4±5,2	25,5±5,0	6,9±2,5

формирование УМЗ состояния методом РКУП снижает ударную вязкость до 0,41 МДж/м<sup>2</sup>. Дополнительная осадка в направлении № 2 позволяет сохранить ударную вязкость равной 0,4 МДж/м<sup>2</sup>, однако в направлении № 1 она снижается до 0,31 МДж/м<sup>2</sup>.

На рис. 4 а–d представлены изломы образцов из титанового сплава ВТ6 в различных состояниях после испытаний на ударную вязкость, типичные для титановых сплавов: имеют плоскую область, которая представлена волокнистой зоной с характерными для нее ямками разрушения, и сдвиговую кромку. Во всех состояниях изломы имеют матовую однородную поверхность, что свидетельствует о макропластическом характере разрушения.

Размер ямок разрушения волокнистой зоны в КЗ состоянии равен ~6 мкм, после РКУП – 2,4 мкм, после РКУП+осадка (YZ) – 2 мкм, после РКУП+осадка (XZ) – 1,9 мкм (рис. 4).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При деформации методом РКУП пластинчатая составляющая подверглась процессам фрагментации и глобуляризации, что привело к формированию мелких частиц средним размером 0,4 мкм. При этом микроструктурный анализ показал металлографическую текстуру, что свойственно материалу после деформации методом РКУП по маршруту С.

После РКУП заготовку подвергали нагреву и осадке при T=750 °C. Это привело к заметному росту глобулярных частиц α- и β-фазы, их размеры возросли до 0,5–1 мкм (рис. 2 с, 2 d). Схожая эволюция УМЗ структуры при осадке была рассмотрена на примере сплава ВТ8М-1 [19].

По результатам механических испытаний на растяжение видно, что предел прочности титанового сплава ВТ6 после РКУП на 25 % больше, чем в исходном горячекатаном состоянии, что связано со значительным измельчением зерен и увеличением плотности дислокаций в процессе ИПД (рис. 3 а). Однако пластичность после РКУП уменьшается почти в 3 раза, поскольку для УМЗ металлов и сплавов характерна ранняя локализация деформации. Дополнительная обработка осадкой

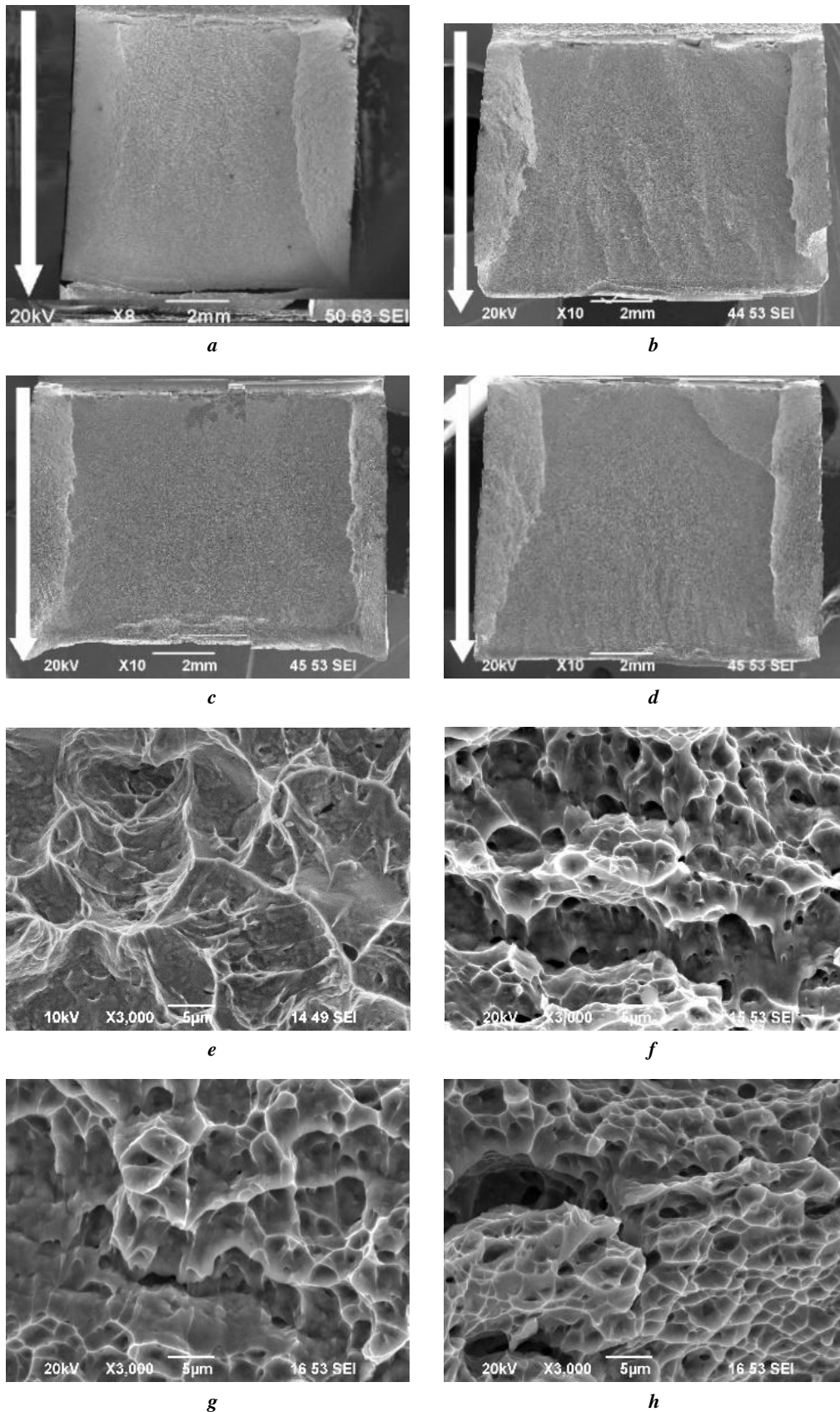
снижает значение прочности на ~13 % и повышает пластичность в 2–2,5 раза по сравнению с состоянием РКУП, подобное изменение прочности и пластичности сплава можно объяснить развитием процессов рекристаллизации.

Незначительная анизотропия прочностных свойств заготовки после РКУП+осадка по сечениям YZ и XZ может быть обусловлена металлографической и кристаллографической текстурой.

Видно, что для УМЗ состояний сохраняется тенденция снижения значений KCV при увеличении прочностных характеристик [20]. Было обнаружено, что образцы РКУП+осадка (№ 1) показали наименьшее значение KCV=0,31 МДж/м<sup>2</sup>. Причиной этого может служить металлографическая и кристаллографическая текстура образца. Влияние кристаллографической структуры на комплекс механических свойств и механизмы разрушения будут более подробно рассмотрены в следующих работах. Необходимо отметить, что полученное значение KCV=0,31 МДж/м<sup>2</sup> является допустимым для конструктивных применений в деталях ГТД (для деталей из ВТ6 по ОСТ 1 900006-86 KCU≥0,35 МДж/м<sup>2</sup>).

Разделение полной работы на ее составляющие – работу зарождения и распространения трещины – имеет большое значение, поскольку именно работа распространения трещины характеризует надежность материала. Работа зарождения трещины минимальна в КЗ состоянии и составляет 14,4 Дж. При формировании УМЗ структуры она заметно возрастает, например в случае образцов РКУП A<sub>z</sub>=27,2 Дж – почти в 2 раза больше по сравнению с исходным состоянием. Работа распространения трещины имеет противоположную закономерность: максимум – 24,0 Дж в КЗ состоянии, минимум – 4,2 Дж для РКУП. Полная работа разрушения образцов РКУП и РКУП+осадка (№ 2) практически одинакова и составляет около 31 Дж, однако работа зарождения трещины в состоянии РКУП больше и связана с более высокими прочностными свойствами по сравнению с РКУП+осадка.

Размер и плотность ямок волокнистой зоны на изломах образцов из титанового сплава ВТ6 в различных состояниях после испытаний на ударную вязкость зависит от размера зерен, особенностей микроструктуры,



**Рис. 4.** Изломы образцов титанового сплава ВТ6 в различных состояниях после испытаний на ударную вязкость: *a, e* – КЗ; *b, f* – РКУП; *c, g* – РКУП+осадка (yz); *d, h* – РКУП+осадка (xz).

*a-d* – РЭМ, общий вид, увеличение  $\times 10$ ; *e-h* – РЭМ, микрорельеф в центральной части излома, увеличение  $\times 3000$ .

Стрелками указано направление разрушения

**Fig. 4.** Fractures of VT6 titanium alloy specimens in different states after impact strength tests:

*a, e* – CG; *b, f* – ECAP; *c, g* – ECAP+upset (yz); *d, h* – ECAP+upset (xz).

*a-d* – SEM, general view, zoom  $\times 10$ ; *e-h* – SEM, micro-relief in the fracture central part, zoom  $\times 3000$ .

Arrows indicate fracture direction

которая была сформирована в процессе деформационно-термических обработок. Видно, что в КЗ состоянии микрорельеф состоит из крупных и глубоких ямок размером ~6 мкм (рис. 4 а, 4 е). Ямки разрушения РКУП и РКУП+осадка в направлении *YZ* немного вытянуты, имеют гладкую поверхность, что связано с пластическим течением (вытяжкой ямок) (рис. 4). Ямки разрушения РКУП+осадка более мелкие, что свидетельствует о меньшем размере и большей концентрации УМЗ структурных элементов, которые являются центром зарождения микрорельефа.

Таким образом, формирование УМЗ состояния позволяет получить высокие прочностные характеристики конструкционных титановых сплавов при удовлетворительном значении ударной вязкости, однако вопрос о текстурном влиянии на сопротивление разрушению требует дальнейшего более тщательного изучения.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показано, что в результате деформации методом РКУП в сплаве ВТ6 была сформирована УМЗ структура со средним размером вторичных  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз 0,4 мкм. Это обеспечило повышение предела прочности сплава с 990 МПа в исходном состоянии до 1250 МПа после деформации методом РКУП.

2. В ходе операции осадки была проведена имитация процесса формовки УМЗ заготовки. Показано, что осадка УМЗ сплава ВТ6 при  $T=750$  °С ведет к развитию процессов рекристаллизации и увеличению размеров вторичных фаз до 0,5–1 мкм, что приводит к снижению предела прочности до 1090 МПа.

3. Установлено, что ударная вязкость KCV сплава ВТ6 с УМЗ структурой составляет 0,41 МДж/м<sup>2</sup>. Выявлено, что в результате деформации методом РКУП и последующей осадки наблюдается анизотропия величины ударной вязкости, что может быть обусловлено наличием металлографической и кристаллографической текстуры в образцах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mao Q., Liu Y., 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).
- Vinogradov A. Mechanical properties of ultrafine-grained metals: new challenges and perspectives // *Advanced Engineering Materials*. 2015. Vol. 17. № 12. P. 1710–1722. DOI: [10.1002/adem.201500177](https://doi.org/10.1002/adem.201500177).
- Estrin Y., Vinogradov A. Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview // *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. № 6. P. 898–907. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2009.06.022](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.06.022).
- Valiev R.Z. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties // *Nature Materials*. 2004. Vol. 3. № 8. P. 511–516. DOI: [10.1038/NMAT1180](https://doi.org/10.1038/NMAT1180).
- Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. № 4. P. 427–556. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2005.08.003](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003).
- Langdon T.G., Furukawa M., Horita Z., Nemoto M. Using intense plastic straining for high-strain-rate superplasticity // *JOM*. 1998. Vol. 50. № 6. P. 41–45. DOI: [10.1007/S11837-998-0126-8](https://doi.org/10.1007/S11837-998-0126-8).
- Zhao Y., Liu J., Topping T.D., Lavernia E.J. Precipitation and aging phenomena in an ultrafine grained Al-Zn alloy by severe plastic deformation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 851. Article number 156931. DOI: [10.1016/j.jallcom.2020.156931](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156931).
- Валиев Р.З., Жилиев А.П., Лэнгдон Т.Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. СПб.: Эко-Вектор, 2017. 479 с.
- Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y., Blank V.D., Botta W.J., Bryla K., Cizek J., Divinski S., Enikeev N.A., Estrin Y., Faraji G. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*. 2022. Vol. 10. № 4. P. 163–256. DOI: [10.1080/21663831.2022.2029779](https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779).
- Suwas S., Ray R.K. *Crystallographic texture of materials*. London: Springer London, 2014. 260 p.
- Sitdikov V.D., Alexandrov I.V., Ganiev M.M., Fakhretidnova E.I., Raab G.I. Effect of temperature on the evolution of structure, crystallographic texture and the anisotropy of strength properties in the Ti Grade 4 alloy during continuous ECAP // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2015. Vol. 41. № 1. P. 44–51.
- Wagner F., Ouarem A., Richeton T., Toth L.S. Improving Mechanical Properties of cp Titanium by Heat Treatment Optimization // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 20. № 4. Article number 1700237. DOI: [10.1002/adem.201700237](https://doi.org/10.1002/adem.201700237).
- Richeton T., Wagner F., Chen C., Toth L.S. Combined effects of texture and grain size distribution on the tensile behavior of  $\alpha$ -titanium // *Materials*. 2018. Vol. 11. № 7. Article number 1088. DOI: [10.3390/ma11071088](https://doi.org/10.3390/ma11071088).
- Boyer R., Welsch G., Collings E.W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. USA: ASM International, 1998. 1048 p.
- Moiseyev V.N. *Titanium alloys in Russia: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2005. 216 p.
- Ermachenko A.G., Lutfullin R.Ya., Mulyukov R.R. Advanced Technologies of Processing Titanium Alloys and Their Applications in Industry // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2011. Vol. 29. № 1. P. 68–82.
- Semenova I.P., Dyakonov G.S., Raab G.I., Grishina Y.F., Huang Y., Langdon T.G. Features of Duplex Microstructural Evolution and Mechanical Behavior in the Titanium Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 20. № 8. Article number 1700813. DOI: [10.1002/adem.201700813](https://doi.org/10.1002/adem.201700813).
- Zherebtsov S.V., Kudryavtsev E.A., Salishchev G.A., Straumal B.B., Semiatin S.L. Microstructure evolution and mechanical behavior of ultrafine Ti-6Al-4V during low temperature superplastic deformation // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 121. P. 152–163. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.09.003).

19. Dyakonov G.S., Semenova I.P., Lopatin N.V., Grishina Y.F., Melemchuk I.A. Microstructure evolution of titanium alloy VT8M-1 with globular-lamellar structure during deformation in temperature range of 650–800° C // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Vol. 8. № 1. P. 1–6. DOI: [10.1134/S2075113317010129](https://doi.org/10.1134/S2075113317010129).
20. Zherebtsov S.V., Kudryavtsev E., Kostjuchenko S., Malysheva S., Salishchev G. Strength and ductility-related properties of ultrafine grained two-phase titanium alloy produced by warm multiaxial forging // *Materials Science and Engineering A*. 2012. Vol. 536. P. 190–196. DOI: [10.1016/J.MSEA.2011.12.102](https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2011.12.102).
- REFERENCES**
- Mao Q., Liu Y., 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).
  - Vinogradov A. Mechanical properties of ultrafine-grained metals: new challenges and perspectives. *Advanced Engineering Materials*, 2015, vol. 17, no. 12, pp. 1710–1722. DOI: [10.1002/adem.201500177](https://doi.org/10.1002/adem.201500177).
  - Estrin Y., Vinogradov A. Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview. *International Journal of Fatigue*, 2010, vol. 32, no. 6, pp. 898–907. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2009.06.022](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.06.022).
  - Valiev R.Z. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties. *Nature Materials*, 2004, vol. 3, no. 8, pp. 511–516. DOI: [10.1038/NMAT1180](https://doi.org/10.1038/NMAT1180).
  - Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, no. 4, pp. 427–556. DOI: [10.1016/J.PMATSCI.2005.08.003](https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2005.08.003).
  - Langdon T.G., Furukawa M., Horita Z., Nemoto M. Using intense plastic straining for high-strain-rate superplasticity. *JOM*, 1998, vol. 50, no. 6, pp. 41–45. DOI: [10.1007/S11837-998-0126-8](https://doi.org/10.1007/S11837-998-0126-8).
  - Zhao Y., Liu J., Topping T.D., Lavernia E.J. Precipitation and aging phenomena in an ultrafine grained Al-Zn alloy by severe plastic deformation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 851, article number 156931. DOI: [10.1016/j.jallcom.2020.156931](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156931).
  - Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Lengdon T.Dzh. *Obemnye nanostrukturnye materialy: fundamentalnye osnovy i primeneniya* [Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications]. Sankt Petersburg, Eko-Vektor Publ., 2017. 479 p.
  - Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y., Blank V.D., Botta W.J., Bryla K., Cizek J., Divinski S., Enikeev N.A., Estrin Y., Faraji G. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 163–256. DOI: [10.1080/21663831.2022.2029779](https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779).
  - Suwas S., Ray R.K. *Crystallographic texture of materials*. London, Springer London Publ., 2014. 260 p.
  - Sitdikov V.D., Alexandrov I.V., Ganiev M.M., Fakhretdinova E.I., Raab G.I. Effect of temperature on the evolution of structure, crystallographic texture and the anisotropy of strength properties in the Ti Grade 4 alloy during continuous ECAP. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2015, vol. 41, no. 1, pp. 44–51.
  - Wagner F., Ouarem A., Richeton T., Toth L.S. Improving Mechanical Properties of cp Titanium by Heat Treatment Optimization. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 20, no. 4, article number 1700237. DOI: [10.1002/adem.201700237](https://doi.org/10.1002/adem.201700237).
  - Richeton T., Wagner F., Chen C., Toth L.S. Combined effects of texture and grain size distribution on the tensile behavior of  $\alpha$ -titanium. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 7, article number 1088. DOI: [10.3390/ma11071088](https://doi.org/10.3390/ma11071088).
  - Boyer R., Welsch G., Collings E.W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. USA, ASM International Publ., 1998. 1048 p.
  - Moiseyev V.N. *Titanium alloys in Russia: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2005. 216 p.
  - Ermachenko A.G., Lutfullin R.Ya., Mulyukov R.R. Advanced Technologies of Processing Titanium Alloys and Their Applications in Industry. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2011, vol. 29, no. 1, pp. 68–82.
  - Semenova I.P., Dyakonov G.S., Raab G.I., Grishina Y.F., Huang Y., Langdon T.G. Features of Duplex Microstructural Evolution and Mechanical Behavior in the Titanium Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 20, no. 8, article number 1700813. DOI: [10.1002/adem.201700813](https://doi.org/10.1002/adem.201700813).
  - Zherebtsov S.V., Kudryavtsev E.A., Salishchev G.A., Straumal B.B., Semiatin S.L. Microstructure evolution and mechanical behavior of ultrafine Ti-6Al-4V during low temperature superplastic deformation. *Acta Materialia*, 2016, vol. 121, pp. 152–163. DOI: [10.1016/J.ACTAMAT.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2016.09.003).
  - Dyakonov G.S., Semenova I.P., Lopatin N.V., Grishina Y.F., Melemchuk I.A. Microstructure evolution of titanium alloy VT8M-1 with globular-lamellar structure during deformation in temperature range of 650–800° C. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1–6. DOI: [10.1134/S2075113317010129](https://doi.org/10.1134/S2075113317010129).
  - Zherebtsov S.V., Kudryavtsev E., Kostjuchenko S., Malysheva S., Salishchev G. Strength and ductility-related properties of ultrafine grained two-phase titanium alloy produced by warm multiaxial forging. *Materials Science and Engineering A*, 2012, vol. 536, pp. 190–196. DOI: [10.1016/J.MSEA.2011.12.102](https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2011.12.102).



## Impact strength of VT6 titanium alloy with the ultra-fine grain structure produced by the equal-channel angular pressing method

© 2022

*Iuliia M. Modina*\*<sup>1</sup>, PhD (Engineering), junior researcher

*Grigory S. Dyakonov*<sup>2</sup>, PhD (Engineering), researcher

*Andrey G. Stotskiy*<sup>3</sup>, junior researcher

*Danil T. Miftakhov*, operator of electronic-computer and computing machines

*Irina P. Semenova*<sup>4</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), leading researcher

*Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)*

\*E-mail: modina\_yulia@mail.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7836-3990>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5389-5547>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2667-1115>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1857-9909>

Received 04.05.2022

Accepted 13.07.2022

**Abstract:** The wide use of two-phase titanium alloys in aircraft engine building, as well as the intense development of this industry, stipulate more and more stringent requirements to structural materials and the enhancement of their reliability, strength and performance characteristics. The formation of an ultrafine-grained (UFG) state in metals and alloys using severe plastic deformation (SPD) processing enables achieving high strength properties. However, an important aspect of UFG materials is their structural and textural effects which may lead to a strong anisotropy of their properties. In this respect, the authors studied the effect of microstructural features on the mechanical properties and impact toughness of the VT6 alloy after equal-channel angular pressing (ECAP) and subsequent deformation by upsetting, imitating die forging. The study showed that the formation of a UFG structure in the VT6 titanium alloy with a grain size of about 0.4  $\mu\text{m}$  allows increasing the ultimate tensile strength up to 1250 MPa. The additional upsetting of the UFG alloy at  $T=750\text{ }^\circ\text{C}$  leads to grain growth up to 0.5–1  $\mu\text{m}$  and a decline in strength to 1090 MPa as a result of the recovery and recrystallization processes. Impact toughness tests were conducted on specimens with a V-shaped stress raiser at room temperature, showing that the impact toughness of the UFG VT6 alloy was 0.41 MJ/m<sup>2</sup>. The tests revealed the anisotropy of impact toughness in the UFG VT6 alloy after equal-channel angular pressing and additional upsetting due to the metallographic and crystallographic texture formed as the result of deformation treatment. In test direction No. 1, the impact toughness value is the lowest and equals 0.31 MJ/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** titanium alloys; VT6; severe plastic deformation; ultra-fine grain structure; metallographic and crystallographic deformation texture; mechanical properties; impact toughness.

**Acknowledgements:** Fine-structural investigations and impact strength tests were financially supported by the grant No. 21-79-10167 of the Russian Science Foundation. Mechanical tensile tests were covered by the science grant from the budget of the Republic of Bashkortostan for state support of young scientists (NOC-GMU-2021). The research part of the work was carried out on the equipment of the Core Facility Centre “Nanotech” of FSBEI HE «USATU».

**For citation:** Modina Iu.M., Dyakonov G.S., Stotskiy A.G., Miftakhov D.T., Semenova I.P. Impact strength of VT6 titanium alloy with the ultra-fine grain structure produced by the equal-channel angular pressing method. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 3, pp. 7–15. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-2-7-15.