

## Анализ изменения микротвердости, скорости ползучести и морфологии поверхности разрушения титана VT1-0, деформируемого в условиях действия постоянного магнитного поля 0,3 Тл

© 2022

*Шляров Виталий Владиславович*<sup>\*1</sup>, аспирант  
кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля  
*Загуляев Дмитрий Валерьевич*<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля  
*Серебрякова Анна Александровна*<sup>3</sup>, аспирант  
кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля  
*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк (Россия)*

\*E-mail: shlyarov@mail.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3979-7777>

Поступила в редакцию 14.07.2021

Принята к публикации 11.03.2022

**Аннотация:** В настоящее время перспективным направлением исследований является изучение поведения технологических и физических характеристик материалов в условиях внешних энергетических воздействий, в частности постоянных магнитных полей. Это связано с возникновением многофакторных научных и производственных проблем, появляющихся с внедрением в производство высоких технологий. Одно из направлений – создание новых приборов, устройств и машин, которые так или иначе формируют вокруг себя электромагнитные поля. Поэтому комплексный подход к изучению влияния магнитопольевых воздействий на деформационные характеристики металлов и сплавов способствует более глубокому пониманию физической природы указанного воздействия. Для исследований в качестве объекта был выбран технически чистый титан марки VT1-0. Работа направлена на изучение влияния постоянного магнитного поля 0,3 Тл на микротвердость, скорость ползучести и поверхность разрушения титана. Результаты показали, что под воздействием постоянного магнитного поля 0,3 Тл происходит снижение относительного значения микротвердости титана марки VT1-0 на 2–5 % с последующей релаксацией до исходного значения. Скорость ползучести титана увеличивается на  $\approx 31$  % при применении поля с индукцией 0,3 Тл в процессе испытания (без применения поля скорость ползучести составляет 2,4 %/ч, в магнитном поле – 3 %/ч). Анализ поверхности разрушения методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показал, что образцы титана испытывают вязкий излом. Поверхность излома характеризуется многочисленными равноосными ямками разрушения. Стоит отметить, что ямки с участками вытяжки присутствуют преимущественно на образцах, разрушенных в условиях ползучести в постоянном магнитном поле 0,3 Тл.

**Ключевые слова:** технический чистый титан; VT1-0; постоянное магнитное поле; индукция 0,3 Тл; микротвердость; скорость ползучести; фрактография поверхности разрушения; равноосные ямки разрушения; волокнистая зона.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-00118). Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

**Для цитирования:** Шляров В.В., Загуляев Д.В., Серебрякова А.А. Анализ изменения микротвердости, скорости ползучести и морфологии поверхности разрушения титана VT1-0, деформируемого в условиях действия постоянного магнитного поля 0,3 Тл // *Frontier Materials and Technologies*. 2022. № 1. С. 91–100. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-91-100.

### ВВЕДЕНИЕ

Обработка с помощью электромагнитного поля позволяет создавать материалы с новыми функциональными возможностями. Использование внешних электрических и магнитных полей предоставляет дополнительную степень свободы для синтеза материалов, адаптации микроструктур и их свойств за счет ускорения или замедления реакций химического взаимодействия, стабилизации метастабильных фаз, независимого контроля роста зерен и возможности изготовления продукции с высокими скоростями деформации при пониженных напряжениях и температурах [1–3]. Известно,

что под влиянием постоянного магнитного поля могут изменяться деформационные характеристики ряда ионных, ионно-ковалентных, ковалентных, молекулярных и металлических твердых тел [4–6].

Значительный практический интерес представляют эффекты, связанные с остаточными изменениями, вызванными магнитными полями. Исследования влияния индукции магнитного поля на структуру, плотность дислокаций, размер зерен, растяжение и микротвердость титанового сплава TC4 показали, что магнитное поле влияет на дефектную структуру сплава и приводит к увеличению микротвердости на 8 % и среднего удлинения при разрыве на 31 % [7; 8]. Схожие эффекты

влияния поля были получены на сплаве ВТЗ-1: установлено, что применение постоянных и импульсных магнитных полей различной напряженности приводит к увеличению пластичности материала [9]. Изменение деформационных характеристик связывают с возникающими в материалах магнитоэластическими эффектами (МПЭ), которые были обнаружены в эпоху Советского Союза на кристаллах NaCl. С тех пор было собрано большое количество экспериментальных результатов и физических моделей. Недавние исследования на кристаллах NaCl показали, что применение магнитного поля приводит к увеличению глубины релаксации и значительному разупрочнению кристаллов [10]. Установлено, что данное явление происходит в результате спин-зависимых переходов в системе «точечный дефект – ядро дислокации» с последующим движением дислокаций в поле дальнедействующих внутренних напряжений в кристалле. Данный процесс может неконтролируемо протекать в ответственных элементах конструкций и устройств, приводя к разрушению, при наложении магнитного поля и иных слабых фоновых радиочастотных полей [11; 12]. В целом МПЭ обнаруживается при индукции магнитного поля 0,1–10 Тл вблизи комнатной температуры и выше и сопровождается изменением характеристик пластичности до нескольких десятков и сотен процентов [13–15].

В работе [16] изучался процесс ползучести образцов алюминиевого сплава, предварительно выдержанных в постоянном магнитном поле 0,7 Тл в течение 30 мин при комнатной температуре и содержащих микровключения железа (Fe~0,4 вес. %). Исследования показали, что предварительное воздействие постоянного магнитного поля (0,7 Тл в течение 30 мин при комнатной температуре) способствует увеличению деформации алюминиевого сплава практически на всех стадиях ползучести. Полученные результаты измерения микротвердости показали значительную разницу в ее значениях для образцов, предварительно подвергнутых магнитной обработке ( $HV=310\pm 30$  МПа), и исходного образца ( $HV=420\pm 30$  МПа). Таким образом, авторы [16] установили, что постоянное магнитное поле приводит к увеличению абсолютной деформации алюминиевого сплава и к уменьшению значения микротвердости.

Исследовалось влияние постоянного магнитного поля 0,12 Тл на микроструктуру и механическое поведение сплава AlSi10Mg. Приведенные экспериментальные результаты показывают, что применение постоянного магнитного поля приводит к уменьшению как плотности пор, так и расстояния между ячеистыми дендритами для сплавов AlSi10Mg, изготовленных методом селективного лазерного плавления. Более того, приложенное магнитное поле благоприятным образом влияет как на прочность, так и на пластичность данных сплавов. В отличие от сплавов AlSi10Mg, полученных методом селективного лазерного плавления без магнитного поля, образцы сплавов, полученных в магнитном поле, имели более высокий предел прочности ( $420\pm 10$  МПа) и лучшее удлинение на 8,8 %. Улучшение механических свойств в основном связано с измельчением зерен и расстоянием между ячеистыми дендритами [17].

Изучено влияние магнитного поля ( $\leq 0,3$  Тл) на распределение растворенной меди и междендритное пере-

охлаждение в направленно кристаллизованных сплавах Al–4,5 мас. % Cu. Результаты показывают, что дендриты измельчаются, а результаты численного моделирования подтверждают, что магнитное поле формирует термоэлектрическую магнитную конвекцию, приводящую к обогащению меди границы раздела «жидкость / твердое тело». Наблюдается утончение стенок дендритов из-за междендритного структурного переохлаждения, вызванного увеличением концентрации растворенной меди [18].

Коллектив авторов под руководством J. Cui исследовал влияние магнитного поля на структуру и микротвердость магниевое сплава AZ91 в процессе полупрерывного литья. Результаты показали, что применение магнитного поля приводит к увеличению источников зародышеобразования и, как следствие, измельчению микроструктуры. Эти изменения сказались на микротвердости: при воздействии переменным магнитным полем с частотой 70 Гц значение микротвердости составляет ~86 HV, с удалением в объем материала значение микротвердости сильно снижается, но все еще остается более высоким по сравнению с литой заготовкой, полученной без применения поля [19].

Показано, что переменное магнитное поле, приложенное в процессе старения сплава AA2219, способно сокращать время, необходимое для достижения максимальных значений твердости. Максимальное значение твердости алюминиевого сплава ~150 HV при стандартных условиях старения достигается за 18 ч, тогда как при наложении переменного магнитного поля на это уходит порядка 12 ч. Установлено, что в процессе старения в магнитном поле наблюдается незначительное увеличение предела текучести и предела прочности сплава [20].

Как показали предыдущие исследования нашей научной группы, магнитные поля в значительной степени влияют на деформационные характеристики и структуру меди и алюминия. Наблюдаются как деградация, так и увеличение прочностных характеристик исследуемых пара- и диамагнитных материалов [21–23].

Цель работы – изучение изменений микротвердости, скорости ползучести на установившейся стадии и морфологии поверхности разрушения технически чистого титана ВТ1-0 под действием постоянного магнитного поля 0,3 Тл.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались образцы технически чистого титана марки ВТ1-0, который в соответствии с ГОСТ 19807-91 «Титан и сплавы титановые деформируемые» имеет следующий химический состав: Fe – до 0,25 %; C – до 0,07 %; Si – до 0,1 %; N – до 0,04 %; Ti – 99,24–99,7 %; O – до 0,2 %; H – до 0,01 %.

Микротвердость измерялась в соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу» с помощью микротвердомера HVS-1000 на образцах в форме параллелепипеда размерами  $10\times 4\times 10$  мм<sup>3</sup>. Перед измерениями проводили отжиг образцов при температуре 800 К в течение 2 ч с последующим охлаждением в печи, механически шлифовали и полировали их. Структуру материала выявляли при помощи химического раствора,

составленного на основе плавиковой и азотной кислот. Микротвердость анализировали по следующему сценарию:

1) определяли микротвердость исходного материала (без магнитного поля);

2) подготовленные образцы помещали в поле на определенное время (от 1 до 2 ч с шагом 0,25 ч) и сразу после экспозиции определяли микротвердость;

3) измеряли микротвердость через определенные интервалы времени, чтобы определить остаточный эффект влияния.

Для исследования процесса ползучести в постоянном магнитном поле была использована установка, разработанная учеными кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля (СибГИУ). Испытательная машина работает совместно с программным комплексом, предназначенным для записи данных удлинения образца от времени эксперимента, а также имеет возможность анализа стадий ползучести и аппроксимации кривых ползучести. Исследование процесса ползучести проводили на образцах проволоки с рабочей длиной 150 мм и диаметром 2 мм. Количеством эффектом влияния характеризовался относительным изменением скорости ползучести на установившейся стадии процесса и микротвердости технически чистого титана ВТ1-0, подсчет проводили в соответствии с зависимостями, представленными в работе [23].

Фрактографический анализ поверхности разрушения образцов титана ВТ1-0, разрушенных в условиях ползучести в постоянном магнитном поле 0,3 Тл, проводили методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на растровом электронном микроскопе TESCAN Vega SB.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования влияния магнитного поля 0,3 Тл на микротвердость титана ВТ1-0 показали, что происходит снижение микротвердости с последующей ее стабилизацией до исходного значения. Характерные зависимости относительного изменения микротвердости от времени, прошедшего после обработки магнитным полем 0,3 Тл в течение разных временных интервалов (от 1 до 2 ч с шагом 0,25 ч), релаксационные кривые изменения микротвердости титана ВТ1-0 приведены на рис. 1.

Анализ начального влияния магнитного поля на микротвердость титана показывает, что увеличение времени выдержки в магнитном поле приводит к линейному снижению микротвердости (рис. 2).

Поскольку начальный эффект влияния магнитного поля на микротвердость различен для разного времени выдержки, интересно проанализировать зависимость времени, необходимого для стабилизации микротвердости, от времени воздействия. Такая зависимость приведена на рис. 3. Она подчиняется линейному закону и описывается уравнением

$$t = 4,4286 * t - 3,2143 .$$

Дальнейшие исследования были направлены на изучение процесса ползучести в постоянном магнитном поле 0,3 Тл. Типичные кривые ползучести титана ВТ1-0,

разрушенного в условиях постоянного магнитного поля 0,3 Тл и без него, представлены на рис. 4.

Анализ проводился на прямолинейном участке кривой, который подчиняется уравнению вида

$$y = kx + b ,$$

где  $k$  – угловой коэффициент, численно равный тангенсу угла наклона прямой (характеризует скорость ползучести);

$b$  – числовой коэффициент.

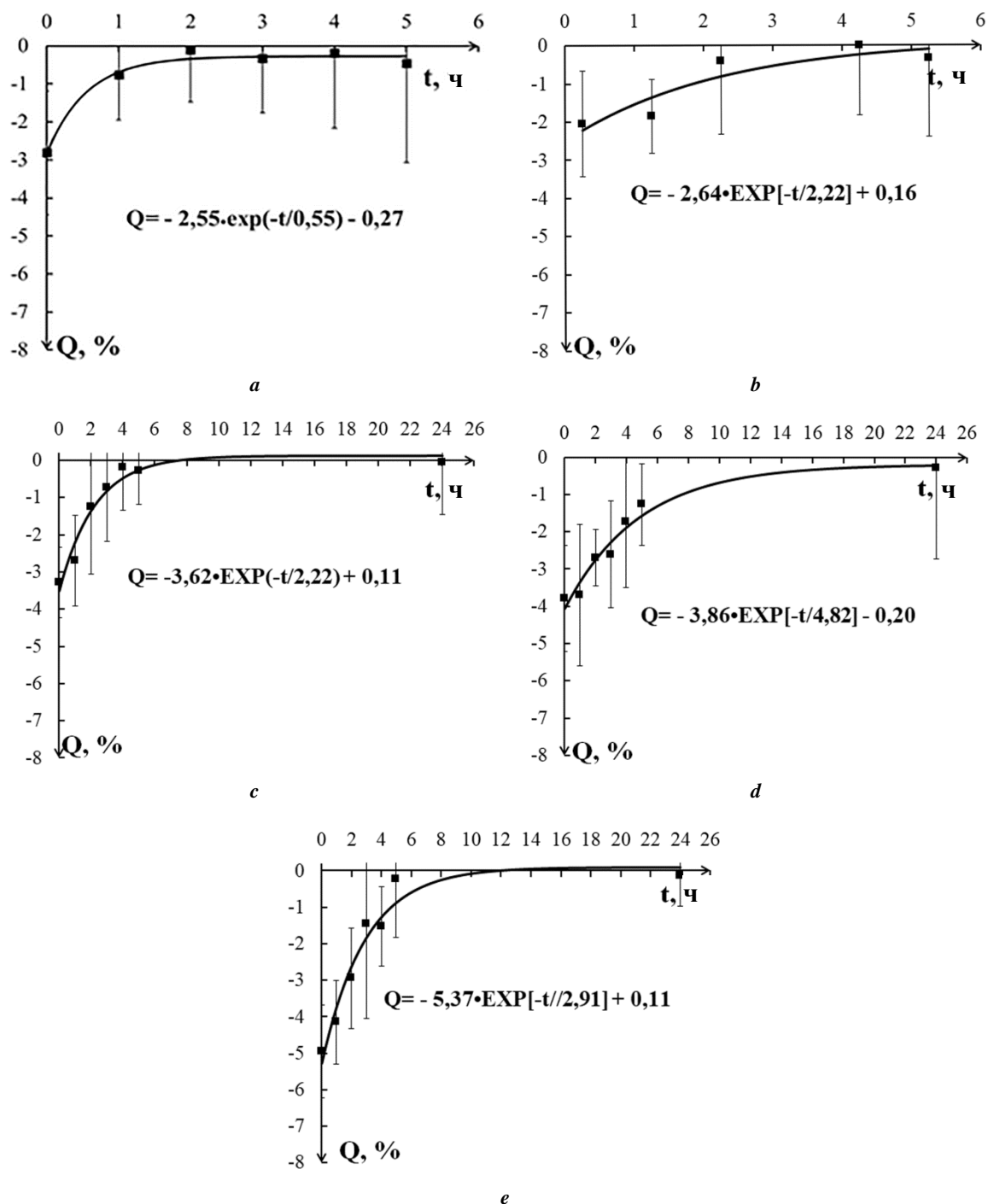
Анализ кривых показал, что они содержат 3 стадии: логарифмическую, установившуюся и ускоренную. Такое поведение материала в условиях ползучести совпадает с общепринятыми представлениями о кинетике данного процесса чистых металлов [24]. Стоит отметить, что магнитное поле не влияет на величину деформации до разрушения, в среднем образцы титана ВТ1-0 в процессе ползучести растягиваются на 37–42 %. Однако время, необходимое для достижения одной и той же степени деформации, различно. Без применения магнитопольевых воздействий необходимо порядка 13,5 ч для разрушения образца титана в условиях ползучести, при наложении постоянного магнитного поля 0,3 Тл это время сокращается на 26 % и составляет порядка 10 ч. Стоит отметить, что на начальной (логарифмической) стадии ползучести действие магнитного поля не выражено.

Дифференцирование кривых ползучести по времени позволяет получить численное значение мгновенной скорости ползучести в различные периоды времени и построить зависимость мгновенной скорости от времени эксперимента (рис. 5).

Посредством программного комплекса экспериментальной установки было определено, что стадия установившейся ползучести, скорость на которой постоянна, начинается приблизительно через 1,67 ч после приложения испытательной нагрузки 212 МПа. Анализ дифференцированных зависимостей показывает, что скорость ползучести на установившейся стадии процесса для образцов, разрушенных без магнитного поля, составляет 2,4 %/ч (рис. 5 а). Наложение постоянного магнитного поля 0,3 Тл в процессе пластической деформации приводит к увеличению скорости ползучести до 3 %/ч (рис. 5 б). Таким образом, можно заключить, что применение магнитного поля способствует увеличению скорости ползучести на  $\approx 31$  %.

Результаты сканирующей электронной микроскопии показывают, что поверхность разрушения образцов характеризуется следующими зонами излома: волокнистая зона, радиальная зона и зона среза. Это означает, что разрушение происходило в условиях стабильного роста трещины [25]. На рис. 6 продемонстрированы фрактограммы поверхности излома образцов титана ВТ1-0, разрушенных в условиях ползучести.

Как видно из рис. 6, касательные напряжения, возникшие в результате вытяжки материала в процессе ползучести, вызывают значительную пластическую деформацию – удлинение и образование шейки (показано стрелками), предшествующую разрушению. Разрушение при растяжении начинается вблизи оси образца, перпендикулярной нагрузке, и распространяется по направлению к поверхности, заканчиваясь конической



**Рис. 1.** Релаксационные зависимости относительного изменения микротвердости ( $Q$ ) от времени, прошедшего после экспозиции образцов из поля. Обработка магнитным полем 0,3 Тл в течение 1 ч (а), 1,25 ч (б), 1,5 ч (с), 1,75 ч (д), 2 ч (е)  
**Fig. 1.** Relaxation dependences of a relative change in microhardness ( $Q$ ) on the time past from the samples' exposition out of the field. Treatment by the magnetic field of 0.3 T during 1 h (a), 1.25 h (b), 1.5 h (c), 1.75 h (d), 2 h (e)

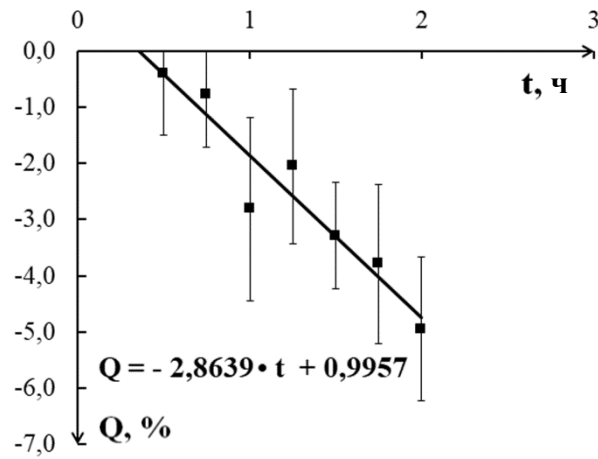


Рис. 2. Начальный эффект влияния магнитного поля 0,3 Тл на микротвердость титана  
 Fig. 2. The initial effect of 0.3 T magnetic field influence on titanium microhardness

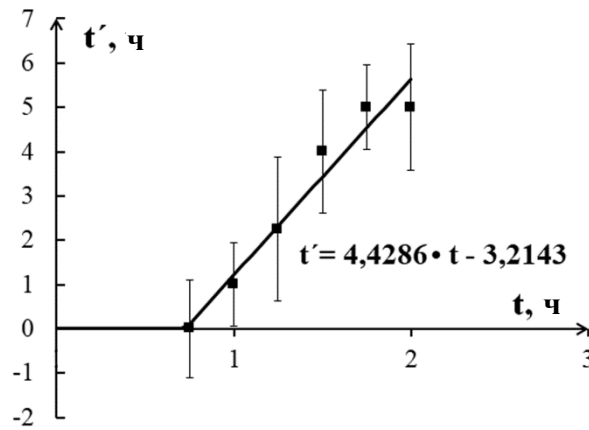


Рис. 3. Зависимость времени стабилизации значения микротвердости (t') от времени воздействия магнитным полем (t) 0,3 Тл  
 Fig. 3. The dependence of microhardness value stabilization time (t') on the time of exposure of magnetic field of 0.3 T (t)

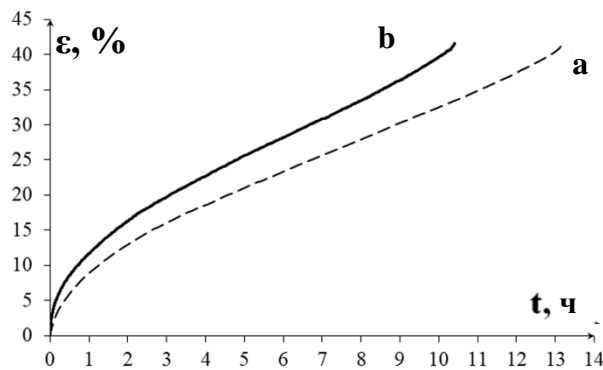
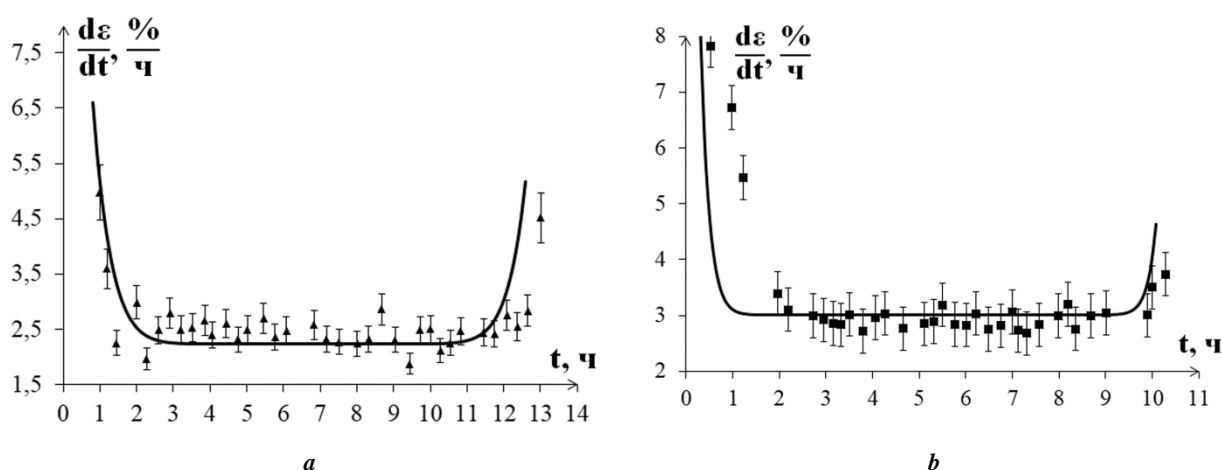
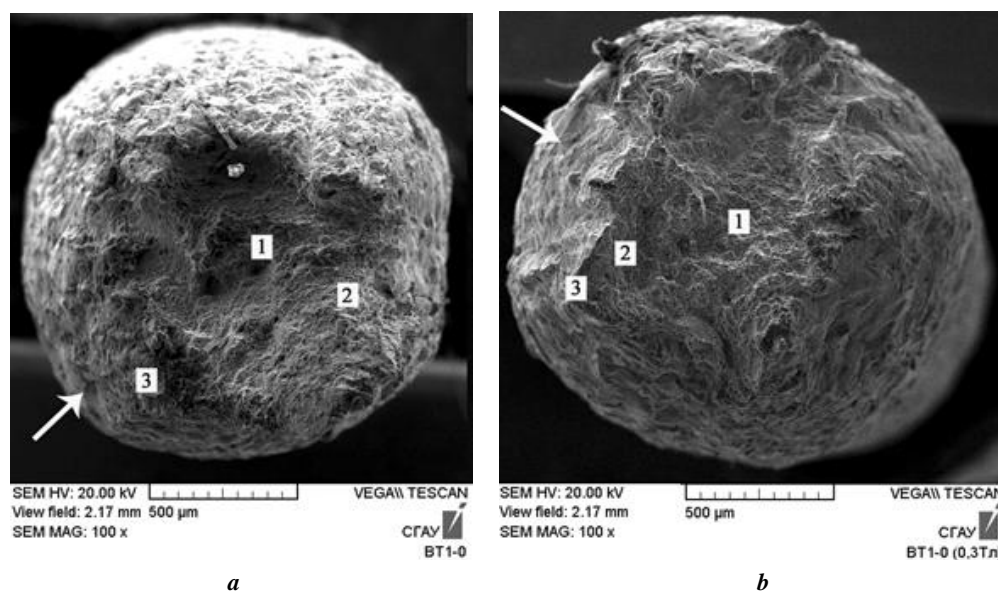


Рис. 4. Типичные кривые ползучести титана VT1-0:  
 a – без магнитного воздействия; b – в постоянном магнитном поле 0,3 Тл  
 Fig. 4. Typical creep curves of VT1-0 titanium:  
 a – without magnetic action; b – in the constant magnetic field of 0.3 T



**Рис. 5.** Характерные зависимости мгновенной скорости ползучести титана от времени испытания:  
*a* – без магнитного поля; *b* – в магнитном поле 0,3 Тл  
**Fig. 5.** Typical dependences of titanium instantaneous creep rate on the testing time:  
*a* – without a magnetic field; *b* – in a magnetic field of 0.3 T



**Рис. 6.** Фрактограмма поверхности изломов титана VT1-0, разрушенного в условиях ползучести:  
*a* – без применения магнитного поля; *b* – в постоянном поле с индукцией 0,3 Тл.  
 1 – волокнистая зона; 2 – радиальная зона; 3 – зона среза  
**Fig. 6.** Fractograph of VT1-0 titanium fracture surfaces fractured under the creeping conditions:  
*a* – without applying a magnetic field; *b* – in a field with induction of 0.3 T.  
 1 – fibrous area; 2 – radial area; 3 – shear area

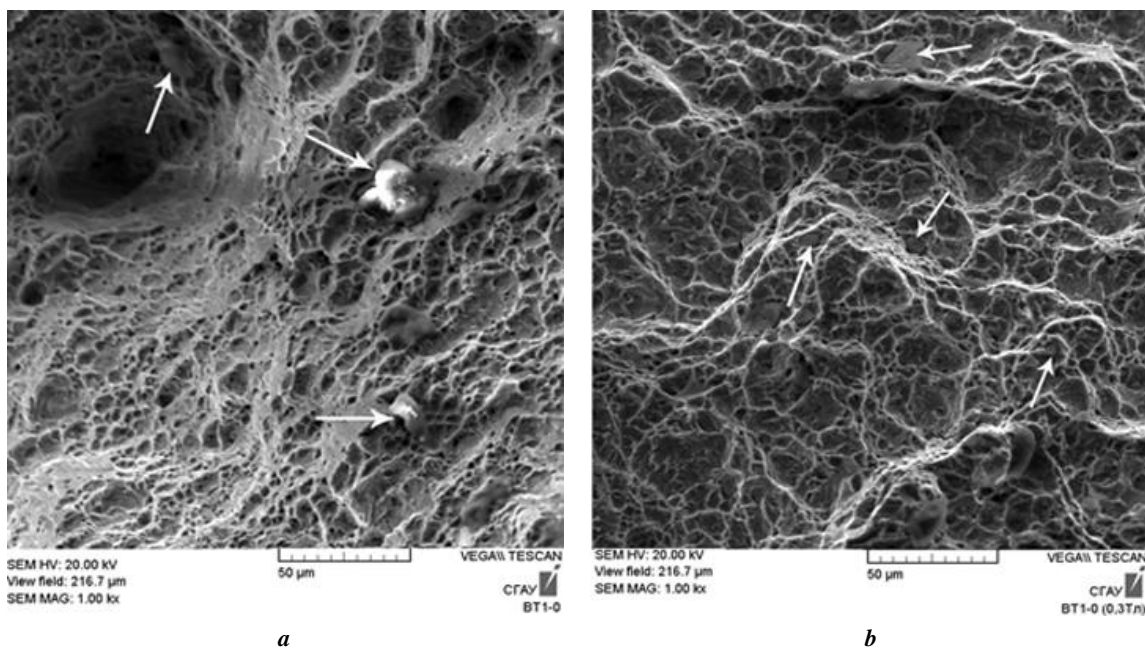
зоной среза. Фрактографический анализ волокнистой зоны образцов титана марки VT1-0, разрушенных в условиях ползучести в постоянном магнитном поле и без него, представлено на рис. 7.

На фрактограмме (рис. 7) видно, что в структуре наблюдается большое количество преимущественно равноосных ямок. В данном случае ямки, образующиеся в результате разрушения, являются признаком вязкого разрушения материала. Непосредственно в ямках разрушения часто видны участки деформации в виде зон вытяжки (на рис. 7 указаны стрелками). Размер данных зон может зависеть от количества мест зарождения

микropор и относительной пластичности матрицы материала [26]. Следует отметить, что ямки разрушения с элементами вытяжки присутствуют преимущественно в образцах титана VT1-0, разрушенного в условиях ползучести в постоянном магнитном поле 0,3 Тл.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ зависимостей на рис. 1 показывает, что микротвердость титана VT1-0 после удаления из магнитного поля релаксирует до исходного значения по экспоненциальному закону. Следует отметить, что полная



**Рис. 7.** Фрактограммы волокнистой зоны изломов титана VT1-0, разрушенного в условиях ползучести: **a** – без магнитного поля; **b** – при ползучести в магнитном поле 0,3 Тл.

Стрелками указаны участки вытяжки титана

**Fig. 7.** Fractographs of a fibrous area of VT1-0 titanium fractures fractured under the creeping conditions: **a** – without a magnetic field; **b** – when creeping in the magnetic field of 0.3 T.

Arrows indicate the titanium stretched areas

релаксация микротвердости происходит за время от 5 до 24 ч в зависимости от условий магнитной обработки. Установлено, что начальный эффект влияния магнитного поля на микротвердость титана является максимальным и наблюдается сразу после удаления образца из магнитного поля (рис. 2). Из зависимости (рис. 2) видно, что влияние магнитного поля 0,3 Тл на микротвердость не наблюдается при времени выдержки в поле менее 0,5 ч. При дальнейшем увеличении времени выдержки эффект линейно возрастает, что говорит о существовании порогового значения. Подобные результаты были получены в работе [27], где исследовалось открепление дислокаций от парамагнитных центров в монокристаллах алюминия. Насыщение магнитоупругого эффекта наступало при значениях магнитной индукции порядка 0,3–0,5 Тл. Таким образом, можно предположить, что изменение деформационных характеристик технически чистого титана VT1-0 связано с откреплением дислокаций (разупрочнением) от стопоров в постоянном магнитном поле. Релаксация микротвердости к исходному значению связана с уменьшением числа подвижных дислокаций, т. е. с их закреплением и, как следствие, увеличением микротвердости до исходной величины в отсутствие поля [28].

Фрактографические исследования не выявили принципиальных различий морфологии поверхности разрушения в экспериментах с наложением магнитного поля и без него. Однако испытания титана при наложении магнитного поля приводят к формированию в волокнистой зоне ямок разрушения с элементами вытяжки, причиной возникновения которой может служить отслоение материала по плоскости или вязкий скол.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследований деформационных характеристик и морфологии поверхности разрушения технически чистого титана VT1-0 установлено, что обработка постоянным магнитным полем 0,3 Тл приводит к уменьшению микротвердости на 2–5 % в зависимости от условий испытания. Приведена зависимость стабилизации значения микротвердости, которая показывает, что время, необходимое на релаксацию микротвердости до исходного значения, линейно зависит от времени выдержки в магнитном поле: чем больше время выдержки в магнитном поле, тем больший эффект его влияния и тем больше времени необходимо на восстановление. Установлено, что постоянное магнитное поле 0,3 Тл способствует увеличению скорости ползучести титана VT1-0 на установившейся стадии процесса, скорость на которой постоянна. Скорость ползучести титана увеличивается на 31 % при применении поля с индукцией 0,3 Тл в процессе испытания (без применения поля скорость ползучести составляет 2,4 %/ч, в магнитном поле – 3 %/ч). Фрактографический анализ поверхности разрушения образцов титана показал, что образцы титана испытывают вязкое разрушение, в структуре отмечается большое количество ямок, в которых наблюдаются элементы вытяжки материала. Однако стоит отметить, что зоны с элементами вытяжки преимущественно образуются в образцах, разрушенных в условиях ползучести в постоянном магнитном поле 0,3 Тл, что может свидетельствовать о высокой локальной пластичности материала. Таким образом, можно утверждать, что постоянное магнитное поле на количественном уровне способно изменять микротвердость

и скорость ползучести технически чистого титана ВТ1-0, при этом не внося существенных изменений в процессы формирования поверхности разрушения материала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моргунов Р.Б., Валеев Р.А., Скворцов А.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Куницына Е.И., Кучеряев В.В., Коплак О.В. Магнитоэластический и магнитомеханический эффекты в алюминиевых сплавах с магнитострикционными микровключениями // Труды ВИАМ. 2019. № 10. С. 3–13. DOI: [10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13).
2. Моргунов Р.Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 2. С. 131–153. DOI: [10.3367/UFNr.0174.200402c.0131](https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200402c.0131).
3. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Термодинамический анализ магнитоэластических эффектов в «немагнитных» металлах // Труды ВИАМ. 2018. № 12. С. 79–87. DOI: [10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87).
4. Jafari M., Ansari R., Rouhi S. First-principle investigation of the elastic and plastic properties of the bismuthene: Effect of the external electric field // Superlattices and Microstructures. 2020. Vol. 140. Article number 106476. DOI: [10.1016/j.spmi.2020.106476](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106476).
5. Huang C., Shuai S., Wang P., Liu X., Wang J., Ren Z. The effect of static magnetic field on solid–liquid interfacial free energy of Al–Cu alloy system // Scripta Materialia. 2020. Vol. 187. P. 232–236. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2020.06.025](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.025).
6. Chen R., Kong H.J., Luan J.H., Wang A.D., Jiang P., Liu C.T. Effect of external applied magnetic field on microstructures and mechanical properties of laser welding joint of medium-Mn nanostructured steel // Materials Science and Engineering: A. 2020. Vol. 792. Article number 139787. DOI: [10.1016/j.msea.2020.139787](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139787).
7. Li G.R., Wang F.F., Wang H.M., Cheng J.F. Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Subjected to High Static Magnetic Field // Materials Science Forum. 2017. Vol. 898 MSF. P. 345–354. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.898.345](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.345).
8. Li G.R., Qin T., Fei A.G., Wang H.M., Zhao Y.T., Chen G., Kai X.Z. Performance and microstructure of TC4 titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment and magnetic field // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 802. P. 50–69. DOI: [10.1016/j.jallcom.2019.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.007).
9. Сейдаметов С.В., Лоскутов С.В. Влияние импульсной электромагнитной обработки на структурные перестройки сплава титана ВТ3-1 // Журнал физики и инженерии поверхности. 2016. Т. 1. № 1. С. 4–8.
10. Galustashvili M.V., Driaev D.G., Kvatchadze V.G. Magnetoelastic Effect under Stress Relaxation in NaCl Crystals // JETP Letters. 2019. Vol. 110. № 12. P. 785–788. DOI: [10.1134/S0021364019240044](https://doi.org/10.1134/S0021364019240044).
11. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petzhik E.A. Resonance magnetoplasticity in ultralow magnetic fields // JETP Letters. 2016. Vol. 104. № 5. P. 353–364. DOI: [10.1134/S0021364016170045](https://doi.org/10.1134/S0021364016170045).
12. Morgunov R.B., Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and magnetic memory in diamagnetic solids // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2009. Vol. 109. № 3. P. 434–441. DOI: [10.1134/S1063776109090076](https://doi.org/10.1134/S1063776109090076).
13. Бучаченко А.Л. О влиянии магнитного поля на механику немагнитных кристаллов: происхождение магнитоэластического эффекта // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2006. Т. 129. № 5. С. 909–913.
14. Сугатов Е.В., Кузьмина Л.В., Газенаур Е.Г., Крашенинин В.И. Влияние концентрации примеси железа и свинца на магнитный порог магнитоэластического эффекта в кристаллах азида серебра // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 4-2. С. 610–613.
15. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petzhik E.A. Chapter 86 - Magnetoplastic Effect in Nonmagnetic Crystals // Dislocations in Solids. 2008. Vol. 14. P. 333–437. DOI: [10.1016/S1572-4859\(07\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S1572-4859(07)00006-X).
16. Skvortsov A.A., Pshonkin D.E., Luk'yanov M.N., Rybakova M.R. Influence of permanent magnetic fields on creep and microhardness of iron-containing aluminum alloy // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. № 3. P. 2481–2485. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.02.002](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.002).
17. Du D., Haley J.C., Dong A., Fautrelle Y., Shu D., Zhu G., Li X., Sun B., Lavernia E.J. Influence of static magnetic field on microstructure and mechanical behavior of selective laser melted AlSi10Mg alloy // Materials and Design. 2019. Vol. 181. Article number 107923. DOI: [10.1016/j.matdes.2019.107923](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107923).
18. Zhu L., Han C., Hou L., Gagnoud A., Fautrelle Y., Ren Z., Li X. Influence of a static magnetic field on the distribution of solute Cu and interdendritic constitutional undercooling in directionally solidified Al-4.5wt.%Cu alloy // Materials Letters. 2019. Vol. 248. P. 73–77. DOI: [10.1016/j.matlet.2019.03.142](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.142).
19. Guo S., Cui J., Le Q., Zhao Z. The effect of alternating magnetic field on the process of semi-continuous casting for AZ91 billets // Materials Letters. 2005. Vol. 59. № 14-15. P. 1841–1844. DOI: [10.1016/j.matlet.2005.01.076](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.01.076).
20. Liu Y.Z., Zhan L.H., Ma Q.Q., Ma Z.Y., Huang M.H. Effects of alternating magnetic field aged on microstructure and mechanical properties of AA2219 aluminum alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 647. P. 644–647. DOI: [10.1016/j.jallcom.2015.05.183](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.183).
21. Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Yaropolova N.G., Ivanov Y.F., Komissarova I.A., Gromov V.E., Effect of the magnetic field on the surface morphology of copper upon creep fracture // Journal of Surface Investigation. 2015. Vol. 9. № 2. P. 410–414. DOI: [10.1134/S1027451015010188](https://doi.org/10.1134/S1027451015010188).
22. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Влияние магнитных полей на структуру и физико-механические свойства алюминия // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2018. № 1. С. 98–104. DOI: [10.18323/2073-5073-2018-1-98-104](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2018-1-98-104).
23. Zagulyaev D., Konovalov S., Shlyarov V., Chen X. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals // Materials Research Ex-



- press. 2019. Vol. 6. № 9. Article number 096523. DOI: [10.1088/2053-1591/ab2c8a](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2c8a).
24. Kassner M.E. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2015. 333 p. DOI: [10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2).
  25. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1988. 399 с.
  26. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 264 с.
  27. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Казакова О.Л. Магнитоэластический эффект и спин-решеточная релаксация в системе дислокация – парамагнитный центр // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1996. Т. 64. № 8. С. 628–633.
  28. Головин Ю.И. Магнитоэластичность твердых тел // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 5. С. 769–803.
- REFERENCES**
1. Morgunov R.B., Valeev R.A., Skvortsov A.A., Korolev D.V., Piskorskiy V.P., Kunitsyna E.I., Kucheryaev V.V., Koplak O.V. Magnetoplastic and magnetomechanic effects in aluminum alloys with magnetostrictive micro inclusions. *Trudy VIAM*, 2019, no. 10, pp. 3–13. DOI: [10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13).
  2. Morgunov R.B. Spin micromechanics in the physics of plasticity. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2004, vol. 174, no. 2, pp. 131–153. DOI: [10.3367/UFNr.0174.200402c.0131](https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200402c.0131).
  3. Morgunov R.B., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. Thermodynamics analysis of magnetoplastic effects in “non-magnetic” metals. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12, pp. 79–87. DOI: [10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87).
  4. Jafari M., Ansari R., Rouhi S. First-principle investigation of the elastic and plastic properties of the bismuthene: Effect of the external electric field. *Superlattices and Microstructures*, 2020, vol. 140, article number 106476. DOI: [10.1016/j.spmi.2020.106476](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106476).
  5. Huang C., Shuai S., Wang P., Liu X., Wang J., Ren Z. The effect of static magnetic field on solid–liquid interfacial free energy of Al–Cu alloy system. *Scripta Materialia*, 2020, vol. 187, pp. 232–236. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2020.06.025](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.025).
  6. Chen R., Kong H.J., Luan J.H., Wang A.D., Jiang P., Liu C.T. Effect of external applied magnetic field on microstructures and mechanical properties of laser welding joint of medium-Mn nanostructured steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 792, article number 139787. DOI: [10.1016/j.msea.2020.139787](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139787).
  7. Li G.R., Wang F.F., Wang H.M., Cheng J.F. Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Subjected to High Static Magnetic Field. *Materials Science Forum*, 2017, vol. 898 MSF, pp. 345–354. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.898.345](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.345).
  8. Li G.R., Qin T., Fei A.G., Wang H.M., Zhao Y.T., Chen G., Kai X.Z. Performance and microstructure of TC4 titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment and magnetic field. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 802, pp. 50–69. DOI: [10.1016/j.jallcom.2019.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.007).
  9. Seydametov S.V., Loskutov S.V. The influence of pulse electromagnetic field on rebuilding of structure of titanium alloy VT3-1. *Zhurnal fiziki i inzhenerii poverkhnosti*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 4–8.
  10. Galustashvili M.V., Driaev D.G., Kvatchadze V.G. Magnetoplastic Effect under Stress Relaxation in NaCl Crystals. *JETP Letters*, 2019, vol. 110, no. 12, pp. 785–788. DOI: [10.1134/S0021364019240044](https://doi.org/10.1134/S0021364019240044).
  11. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzikh E.A. Resonance magnetoplasticity in ultralow magnetic fields. *JETP Letters*, 2016, vol. 104, no. 5, pp. 353–364. DOI: [10.1134/S0021364016170045](https://doi.org/10.1134/S0021364016170045).
  12. Morgunov R.B., Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and magnetic memory in diamagnetic solids. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2009, vol. 109, no. 3, pp. 434–441. DOI: [10.1134/S1063776109090076](https://doi.org/10.1134/S1063776109090076).
  13. Buchachenko A.L. Effect of magnetic field on mechanics of nonmagnetic crystals: the nature of magnetoplasticity. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2006, vol. 102, no. 5, pp. 795–798.
  14. Sugatov E.V., Kuzmina L.V., Gazenaur E.G., Krashenin V.I. The influence of concentration of iron and lead impurities on the magnetic threshold of the magnetoplastic effect in the silver azide crystals. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2014, vol. 11, no. 4-2, pp. 610–613.
  15. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzikh E.A. Chapter 86 – Magnetoplastic Effect in Non-magnetic Crystals. *Dislocations in Solids*, 2008, vol. 14, pp. 333–437. DOI: [10.1016/S1572-4859\(07\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S1572-4859(07)00006-X).
  16. Skvortsov A.A., Pshonkin D.E., Luk'yanov M.N., Rybakova M.R. Influence of permanent magnetic fields on creep and microhardness of iron-containing aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8, no. 3, pp. 2481–2485. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.02.002](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.002).
  17. Du D., Haley J.C., Dong A., Fautrelle Y., Shu D., Zhu G., Li X., Sun B., Lavernia E.J. Influence of static magnetic field on microstructure and mechanical behavior of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Materials and Design*, 2019, vol. 181, article number 107923. DOI: [10.1016/j.matdes.2019.107923](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107923).
  18. Zhu L., Han C., Hou L., Gagnoud A., Fautrelle Y., Ren Z., Li X. Influence of a static magnetic field on the distribution of solute Cu and interdendritic constitutional undercooling in directionally solidified Al-4.5wt.%Cu alloy. *Materials Letters*, 2019, vol. 248, pp. 73–77. DOI: [10.1016/j.matlet.2019.03.142](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.142).
  19. Guo S., Cui J., Le Q., Zhao Z. The effect of alternating magnetic field on the process of semi-continuous casting for AZ91 billets. *Materials Letters*, 2005, vol. 59, no. 14-15, pp. 1841–1844. DOI: [10.1016/j.matlet.2005.01.076](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.01.076).
  20. Liu Y.Z., Zhan L.H., Ma Q.Q., Ma Z.Y., Huang M.H. Effects of alternating magnetic field aged on microstructure and mechanical properties of AA2219 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 647, pp. 644–647. DOI: [10.1016/j.jallcom.2015.05.183](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.183).
  21. Zagulyaev D.V., Kononov S.V., Yaropolova N.G., Ivanov Y.F., Komissarova I.A., Gromov V.E., Effect of

- the magnetic field on the surface morphology of copper upon creep fracture. *Journal of Surface Investigation*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 410–414. DOI: [10.1134/S1027451015010188](https://doi.org/10.1134/S1027451015010188).
22. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Gromov V.E. The influence of magnetic fields on the structure and physico-mechanical properties of aluminum. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 98–104. DOI: [10.18323/2073-5073-2018-1-98-104](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2018-1-98-104).
23. Zagulyaev D., Kononov S., Shlyarov V., Chen X. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, no. 9, article number 096523. DOI: [10.1088/2053-1591/ab2c8a](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2c8a).
24. Kassner M.E. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. 3rd ed. Amsterdam, Elsevier Ltd. Publ., 2015. 333 p. DOI: [10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2).
25. Ivanova V.S., Shanyavskiy A.A. *Kolichestvennaya fraktografiya. Uсталостное разрушение* [Quantitative fractography. Fatigue failure]. Chelyabinsk, Metallurgiya. Chelyabinskoe otdelenie Publ., 1988. 399 p.
26. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fraktodiagnostika razrusheniya metallicheskih materialov i konstruksiy* [Fracture diagnostic of metallic materials and constructions]. Moscow, MISiS Publ., 2007. 264 p.
27. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Kazakova O.L. Magnetoplastic effect and spin-lattice relaxation in the dislocation – paramagnetic center system. *Pisma v zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki*, 1996, vol. 64, no. 8, pp. 628–633.
28. Golovin Yu.I. Magnetoplastic effects in solids. *Physics of the Solid State*, 2004, vol. 46, no. 5, pp. 789–824.

## The analysis of changes in microhardness, creep rate, and morphology of the VT1-0 titanium fracture surface deformed under the action of the constant magnetic field of 0.3 T

© 2022

Vitaly V. Shlyarov\*<sup>1</sup>, postgraduate student of Professor V.M. Finkel Chair of Natural Science Disciplines  
Dmitry V. Zagulyaev<sup>2</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor,  
assistant professor of Professor V.M. Finkel Chair of Natural Science Disciplines

Anna A. Serebryakova<sup>3</sup>, postgraduate student of Professor V.M. Finkel Chair of Natural Science Disciplines  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk (Russia)

\*E-mail: [shlyarov@mail.ru](mailto:shlyarov@mail.ru)<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X><sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949><sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3979-7777>

Received 14.07.2021

Accepted 11.03.2022

**Abstract:** Today, a promising research area is the study of the behavior of the materials' technological and physical characteristics under the external energy effects, such as constant magnetic fields. It is caused by the emergence of multifactorial scientific and industrial problems arising because of the introduction of high technologies into production. One of the directions is the production of new equipment, devices, and machines that somehow form electromagnetic fields around them. Therefore, an umbrella approach to studying the influence of magnetic field effects on the deformation characteristics of metals and alloys contributes to a deeper understanding of the physical nature of this effect. As an object for the research, the authors selected commercially pure titanium of VT1-0 grade. The work aims to study the influence of a constant magnetic field of 0.3 T on microhardness, creep rate, and fracture surface of commercially pure VT1-0 titanium. The results show that under the influence of a constant magnetic field of 0.3 T, the relative value of VT1-0 titanium microhardness decreases by 2–5 %, followed by relaxation to the initial value. The creep rate of titanium increases by approximately 31 % when applying a field of 0.3 T induction during the test (without field applying, the creep rate is 2.4 %/h, in the magnetic field is 3 %/h). The fracture surface analysis using scanning electron microscopy (SEM) shows that titanium specimens undergo ductile fracture. Numerous equiaxial destruction pits characterize the fracture surface. It should be noted that pits with the stretched areas are present mainly on the samples destroyed under the creep conditions in a constant magnetic field of 0.3 T.

**Keywords:** commercial pure titanium; VT1-0; constant magnetic field; induction of 0.3 T; microhardness; creep rate; fracture surface fractography; equiaxial destruction pits; fibrous zone.

**Acknowledgments:** The study was carried out with the support of the grant of the Russian Science Foundation (project No. 21-79-00118).

The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

**For citation:** Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Serebryakova A.A. The analysis of changes in microhardness, creep rate, and morphology of the VT1-0 titanium fracture surface deformed under the action of the constant magnetic field of 0.3 T. *Frontier Materials and Technologies*, 2022, no. 1, pp. 91–100. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-1-91-100](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-1-91-100).