
К.В. АКСЁНОВА,
канд. техн. наук
Д.В. ЗАГУЛЯЕВ,
канд. техн. наук, доцент
В.В. ШЛЯРОВ,
аспирант
Сибирский государственный
индустриальный университет
Новокузнецк, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТИТАНА VT1-0 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Выполнены циклические испытания на многоцикловую усталость образцов титана VT1-0, осуществленные в обычных условиях (без магнитного поля) и при воздействии постоянного магнитного поля разной величины ($B = 0,3, 0,4, 0,5$ Тл). Показано, что применение постоянного магнитного поля с различной индукцией приводит к кратному увеличению среднего количества циклов до разрушения образцов титана на 64, 123 и 163 %, соответственно. Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что поверхность разрушения образцов, независимо от режимов усталостных испытаний (с магнитным полем или без) характеризуется тремя зонами: зона усталостного роста трещины, зона ускоренного роста трещины и зона долома. Выявлено, что ширина зоны усталостного роста трещины зависит от индукции магнитного поля и достигает максимальных значений ($h = 264$ мкм) при $B = 0,4$ Тл, а при усталостных испытаниях без магнитного поля $h = 182$ мкм. Это указывает на увеличение критической длины трещины (ширины зоны усталостного роста трещины) в 1,45 раза. Установлено формирование в зоне усталостного роста трещины образцов титана субзеренной (фрагментированной) структуры. Размеры субзерен соответствуют расстоянию между усталостными бороздками, что оказывает тормозящее влияние на передвижение микротрещины. Показано, что среднее расстояние между усталостными бороздками в зоне ускоренного роста трещины образцов титана зависит от величины магнитной индукции и снижается от 0,78 мкм в отсутствие поля до 0,49 мкм при $B = 0,5$ Тл. В совокупности выявленные факты свидетельствуют о более высокой сопротивляемости материала распространению усталостной трещины и об увеличении ресурса его работоспособности при усталостных испытаниях в магнитном поле, что коррелирует с данными по увеличению среднего количества циклов до разрушения образцов титана VT1-0.

Ключевые слова: магнитное поле, титан VT1-0, многоцикловая усталость, поверхность излома, структура, фазовый состав.

K.V. AKSENOVA,
Cand. of Tech. Sciences
D.V. ZAGULIAEV,
Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor
V.V. SHLYAROV,
Postgraduate Student
Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation

INCREASING THE FATIGUE LIFE OF TITANIUM VT1-0 UNDER THE INFLUENCE OF A CONSTANT MAGNETIC FIELD

Cyclic tests for high-cycle fatigue of samples of titanium VT1-0 were carried out under normal conditions (without a magnetic field) and under the influence of a constant magnetic field of various magnitudes ($B = 0.3, 0.4, 0.5$ T). It is shown that the use of a constant magnetic field with different induction leads to a multiple increase in the average number of cycles before the destruction of titanium samples by 64, 123 and 163%, respectively. Using scanning electron microscopy, it was found that the fracture surface of samples, regardless of the fatigue test modes (with or without a magnetic field), is characterized by three zones: a fatigue crack growth zone, an accelerated crack growth zone, and a fracture zone. It was found that the width of the fatigue crack growth zone depends on the magnetic field induction and reaches its maximum values ($h = 264 \mu\text{m}$) at $B = 0.4$ T, and during fatigue tests without a magnetic field, $h = 182 \mu\text{m}$. This indicates an increase in the critical crack length (the width of the fatigue crack growth zone) by a factor of 1.45. The formation of a subgrain (fragmented) structure in titanium specimens in the zone of fatigue crack growth has been established. The subgrain sizes correspond to the distance between the fatigue grooves, which has a retarding effect on the movement of a microcrack. It is shown that the average distance between fatigue grooves in the zone of accelerated crack growth in titanium samples depends on the value of magnetic induction and decreases from $0.78 \mu\text{m}$ in the absence of a field to $0.49 \mu\text{m}$ at $B = 0.5$ T. Taken together, the revealed facts indicate a higher resistance of the material to the propagation of a fatigue crack and an increase in its service life during fatigue tests in a magnetic field, which correlates with data on an increase in the average number of cycles to failure of titanium samples VT1-0.

Keywords: magnetic field, titanium VT1-0, high-cycle fatigue, fracture surface, structure, phase composition.

Введение

Внешняя энергетическая обработка широко применяется для увеличения срока службы металлических элементов и конструкций, основной причиной повреждения которых, наряду с коррозией и износом, является усталость [1, 2]. Традиционные методы внешнего энергетического воздействия, такие как термическая, химико-термическая, электронно-пучковая, плазменная, лазерная обработки и т.д., за счет перестройки дислокационной субструктуры и фазового состава металлов и сплавов влияют их на структуру, физические и механические свойства, в том числе усталостную долговечность [3–7].

Одним из эффективных, но менее изученных методов внешнего энергетического воздействия являются магнитные поля, позволяющие модифицировать микроструктуру и оптимизировать свойства материалов [8–12]. Например, в результате применения магнитного поля для обработки поверхности заэвтектического силумина происходит измельчение фаз первичного кремния, за счет чего увеличивается его твердость и микротвердость [9]. Результаты механических испытаний титанового сплава TC4 [13] показали, что после обработки сильным импульсным магнитным полем 3 Тл увеличивается прочность материала на 7,6 %, что, по мнению авторов, объясняется дислокационным упрочнением. В ходе испытаний на растяжение титанового сплава TC4 [14] было выяснено, что из-за обработки сильным постоянным магнитным полем материал становится более пластичным, а именно, среднее удлинение составляло 12–13 %, что больше на 31,07 % по сравнению с необработанным образцом, которое составляло 10,01 %. Обработка постоянными магнитными полями также способствовала упрочнению сплава TC4: под воздействием индукции 2 Тл его микротвердость увеличилась на 8,09 % [15]. Для сплава BT3-1 применение постоянных и импульсных магнитных полей различной напряженности приводит к увеличению его пластичности [16, 17].

Были также проведены обширные исследования по влиянию магнитных полей на усталостное разрушение различных металлов и сплавов [18–21]. Примером подобных исследований может служить работа [19], в которой образцы стали AISI 8620 подвергались воздействию магнитного поля 10 Тл в течение 0, 10 и 20 дней. Это воздействие привело к увеличению усталостного срока службы за счет увеличения предела текучести и предела прочности, а также уменьшения модуля упругости. Авторы [20] также наблюдали

увеличение на 10–15 % усталостного ресурса стали 35CrMo под влиянием магнитного поля величиной 1,2–1,3 Тл. Существенное (более чем в 3 раза) увеличение усталостной выносливости стали EN8 и сплава AA2014-T6 при обработке переменным магнитным полем 0,54 Тл авторы [21] связывают с увеличением остаточных сжимающих напряжений в приповерхностных слоях обоих металлов в результате обработки.

Можно сделать вывод, что характер влияния постоянных и импульсных магнитных полей на структуру и деформационные характеристики, особенно на сопротивление усталости, титановых сплавов изучен недостаточно. Поскольку титан нашел широкое применение в аэрокосмической области, где основная часть металлических отказов происходит из-за усталостного разрушения, а магнитное поле является фактором окружающей среды (космос), то настоящая работа является весьма актуальной для понимания физической природы воздействия магнитных полей различной напряженности на усталостное поведение титана. Ранее нашим научным коллективом проведены работы по исследованию влияния постоянных магнитных полей на микротвердость и скорость ползучести титана BT1-0 [22–24]. В данной работе экспериментально исследовано влияние постоянного магнитного поля с индукцией от 0,3 до 0,5 Тл (*in situ*) на усталостную долговечность технически чистого титана марки BT1-0 при циклических асимметричных нагрузках.

Материал и методика исследования

Материалом для исследований являлся технически чистый титан марки BT1-0, который согласно ГОСТ 19807-91 имеет следующий химический состав: 99,24–99,7 % Ti, Fe < 0,25 %, C < 0,07 %, Si < 0,1 %, N < 0,04 %, O < 0,2 %, H < 0,01 %. Исследуемые образцы титана в соответствии с ГОСТ 25.502-79 имели форму параллелепипеда с размерами 4×12×130 мм. Имитация трещины (концентраторы напряжений) осуществлялась двумя надрезами в виде полуокружности радиусом 20 мм в центральной части образца. Образцы в областях концентраторов напряжений подвергались механической шлифовке наждачными бумагами с уменьшающейся дисперсностью частиц абразива. После шлифования на бумагах проводили полировку образцов алмазной пастой с частицами абразива размерностью до 1 мкм (до придания зеркального блеска). Подготовку поверхности в области концентратора напряжений осуществляли с целью уменьшения шероховатости поверхности, поскольку известно, что при циклических нагрузках

разрушение деталей связано с развитием усталостных трещин, возникающих непосредственно в поверхностном слое [1].

Испытания на многоцикловую усталость проводили на специальной установке, разработанной авторским коллективом [25], по схеме циклического асимметричного консольного изгиба (рис. 1). Во время испытаний определялось число циклов, которые образцы выдерживали до разрушения. Температура испытаний во всех случаях была комнатной (~300 К). Частота нагружения образцов изгибом составляла ~ 3,3 Гц. Чтобы образец до разрушения выдерживал не менее 105 циклов нагружения, экспериментально подбирали верхнее значение напряжения цикла нагрузки и амплитуды нагружения. По результатам пробных испытаний для проведения дальнейших многоцикловых усталостных испытаний образцов титана в условиях воздействия магнитного поля и без него был выбран режим, при котором амплитуда нагружения не изменялась и составляла 3,5 мм, а максимальное напряжение цикла нагрузки 33 МПа. Осуществляли усталостные испытания образцов в исходном состоянии (без применения магнитного поля) и в магнитном поле (*in situ*) при величине индукции $B = 0,3; 0,4; 0,5$ Тл. Величину магнитной индукции контролировали при помощи миллитесламетра ТПУ, точность измерений которого до 0,01 мТл. Для каждого значения индукции магнитного поля испытывали не менее 10 образцов.

Исследования поверхности разрушения проводили методами сканирующей электронной микроскопии (прибор LEO EVO 50). Размер структурных элементов определяли с помощью специализированного программного комплекса для анализа и обработки изображений ImageJ. Анализ статистической оценки достоверности полученных экспериментальных результатов проводили с использованием математического пакета Origin Pro 8.5.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате исследований установлено, что технически чистый титан марки ВТ1-0, подвергнутый многоцикловым усталостным испытаниям без применения магнитного поля, разрушается в среднем через 121478 циклов после приложения асимметричной нагрузки с частотой ~3,3 циклов/с. После включения в процессе испытаний постоянного магнитного поля происходит значительное увеличение усталостной долговечности. А именно, среднее число циклов до разрушения при воздействии постоянного магнитного поля составляет: 199105 при $B = 0,3$ Тл, 270492 при $B = 0,4$ Тл и 319828 при $B = 0,5$ Тл.

Зависимость среднего количества циклов до разрушения N от параметров внешнего магнитного поля (индукции B) представлена на рисунке 2. Анализируя представленную зависимость, можно

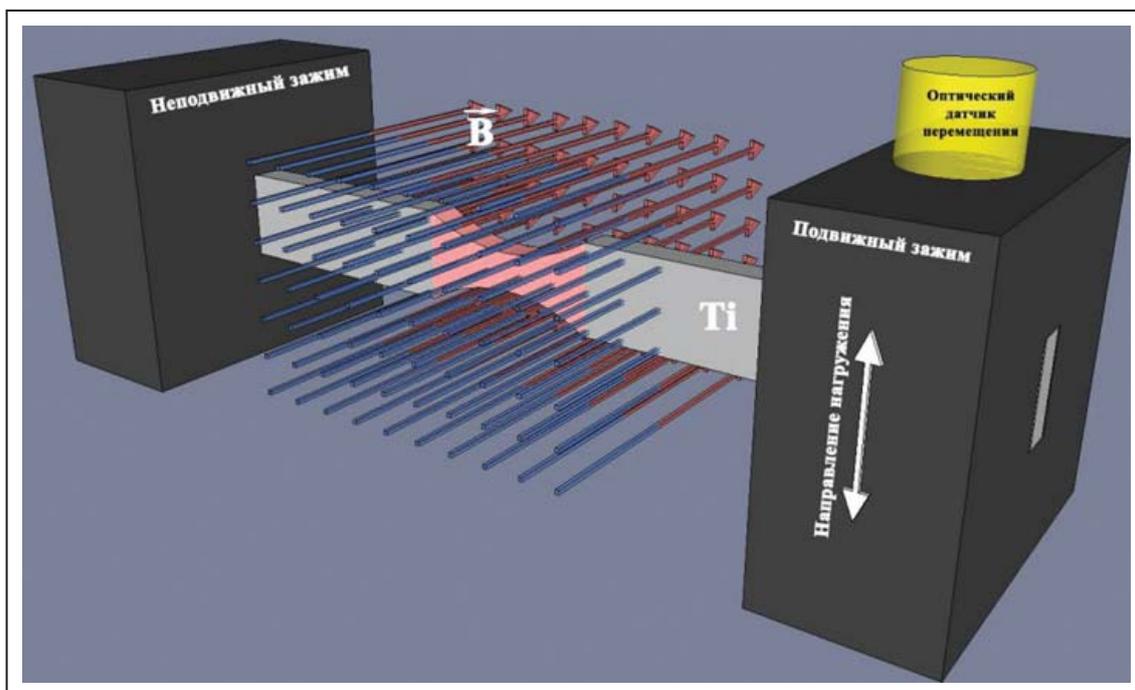


Рис. 1. Схема усталостных испытаний образцов титана в постоянном магнитном поле (*in situ*)

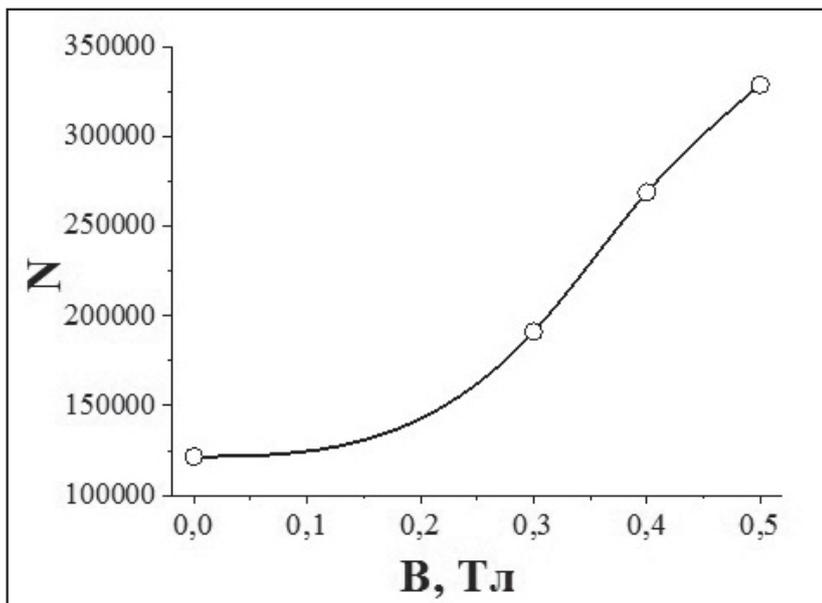


Рис. 2. Зависимость среднего количества циклов до разрушения N от величины магнитной индукции поля B при циклических испытаниях на усталостную долговечность технически чистого титана ВТ1-0

утверждать, что использование постоянного магнитного поля с индукцией 0,3, 0,4 и 0,5 Тл приводит к кратному увеличению усталостной долговечности образцов титана ВТ1-0 на 64, 123 и 163 %, соответственно.

Очевидно, что кратное (более чем в 2,5 раза) увеличение количества циклов до разрушения будет сказываться на состоянии поверхности разрушения образцов титана. Для исследования поверхности разрушения были выбраны образцы титана, значения числа циклов до разрушения которых при каждом режиме были наиболее близки к средним: 121558 в исходном состоянии, 191320 при $B = 0,3$ Тл, 269012 при $B = 0,4$ Тл и 329151 при $B = 0,5$ Тл.

Известно, что процесс усталостного разрушения развивается со временем в локальных объемах материала, а разрушение образца в целом наступает при достижении определенного критического состояния [1]. В общем случае поверхность разрушения, независимо от режима испытаний, имеет три характерные зоны (рис. 3, а): зону усталостного роста трещины (1), зону ускоренного роста трещины (2) и зону долома (3) [26]. Происходящие при усталостных испытаниях деформационные процессы наиболее интенсивно развиваются в зоне усталостного роста трещины (рис. 3, б, указана стрелкой) и гораздо меньше в зоне долома.

На рисунке 4 приведены изображения поверхности разрушения образцов титана, разрушенного в магнитном поле разной величины. В ходе исследований поверхности излома образцов титана ВТ1-0, установлено, что ширина зоны усталостного роста трещины зависит от индукции магнитного поля и достигает максимальных значений

($h = 264$ мкм) при $B = 0,4$ Тл (рис. 4, в). При усталостных испытаниях без магнитного поля $h = 182$ мкм (рис. 4, а). Ширину зоны усталостного роста трещины приравнивают к критической длине трещины [27]. Следовательно, при усталостном нагружении в магнитном поле критическая длина трещины возрастает в 1,45 раза, что указывает на увеличение ресурса работоспособности материала.

Важным признаком циклических усталостных испытаний материала является наличие усталостных бороздок [26–29], характерное изображение которых приведено на рисунке 5. Под понятием «усталостные бороздки» понимают полосы последовательно расположенных углублений и выступов или полосы со ступеньками сброса, ограниченные этими углублениями, располагающиеся параллельно фронту трещины. С каждым циклом нагружения трещина (излом) продвигается вперед на определенное расстояние, оставляя последовательный ряд полосок на поверхности разрушения. Следовательно, данные полоски являются следом трещины, перемещающейся в общем случае на один шаг за каждый цикл нагружения.

При прочих равных условиях, связанных с организацией эксперимента усталостного нагружения, расстояние между бороздками будет определяться способностью материала сопротивляться распространению усталостной трещины: чем меньше расстояние между бороздками, тем большей сопротивляемостью распространению трещины обладает материал и, следовательно, ниже скорость распространения трещины [29]. Проведенные нами исследования зоны ускоренного роста трещины показали, что среднее расстояние между усталостными бороздками в образцах титана зависит от величины

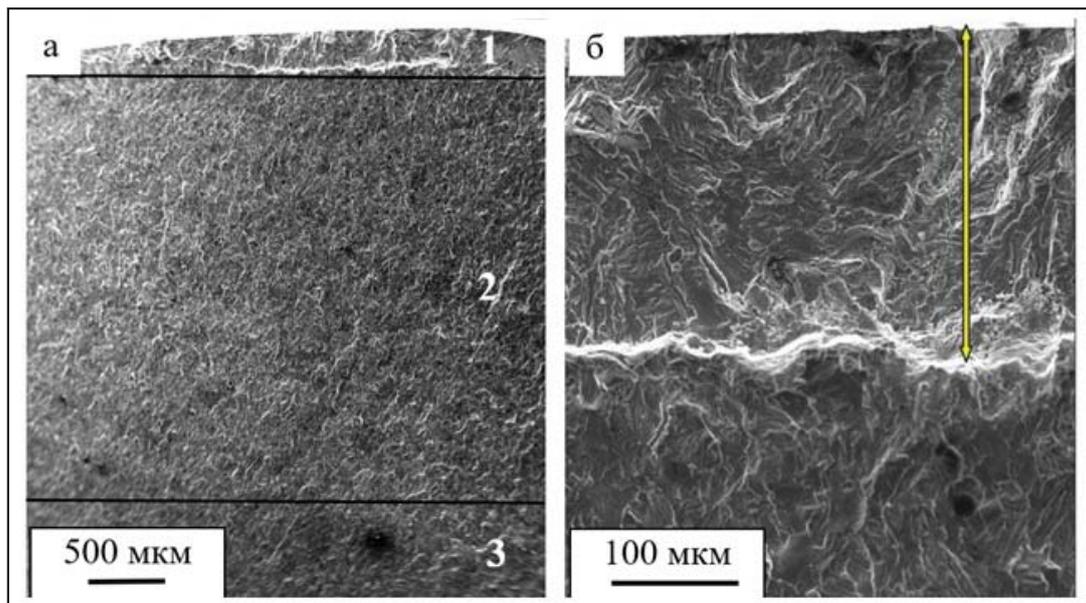


Рис. 3. Структура поверхности разрушения образца титана, подвергнутого усталостным испытаниям в магнитном поле при $B = 0,4$ Тл. На (а) цифрами обозначены характерные зоны усталостного разрушения: 1 – зона усталостного роста трещины; 2 – зона ускоренного роста трещины; 3 – зона долома. Стрелкой на (б) указана зона усталостного роста трещины

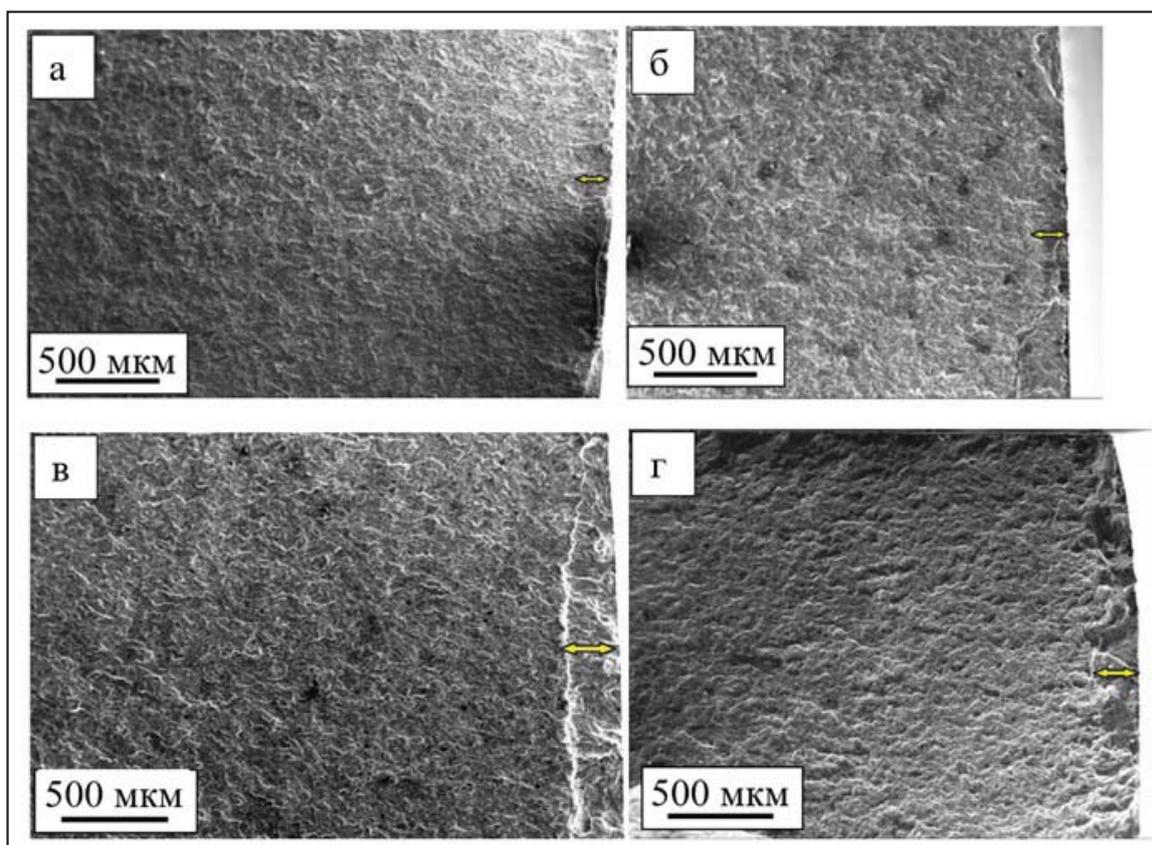


Рис. 4. Структура поверхности разрушения титана, подвергнутого усталостным испытаниям в магнитном поле: а – 0 Тл; б – 0,3 Тл; в – 0,4 Тл; г – 0,5 Тл. Стрелкой указана зона усталостного роста трещины

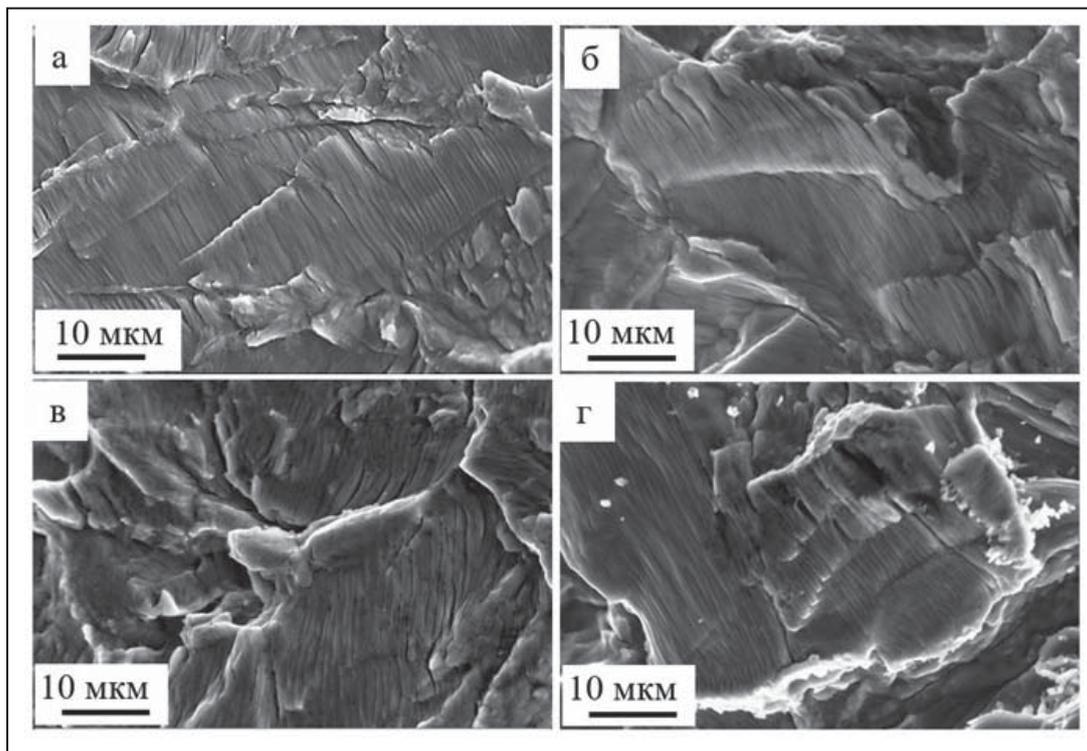


Рис. 5. Усталостные бороздки, формирующиеся в титане в результате усталостного разрушения в постоянном магнитном поле: а – 0 Тл; б – 0,3 Тл; в – 0,4 Тл; г – 0,5 Тл

магнитной индукции магнитного поля и снижается от 0,78 мкм при $B = 0,0$ Тл до 0,49 (рис. 5, а) при $B = 0,5$ Тл (рис. 5, г). Следовательно, шаг трещины за один цикл усталостного нагружения в магнитном поле (при $B = 0,5$ Тл) в образце титана в 1,5 раза меньше, по сравнению с образцом, разрушенным в отсутствие поля. Это говорит о том, что образец титана, разрушенный в магнитном поле, обладает более высокой сопротивляемостью распространению усталостной трещины.

В условиях усталостного нагружения достаточно развит процесс формирования упрочненного поверхностного слоя [26]. На рисунке 6 приведены изображения структуры поверхностного слоя разрушенных образцов титана (зона усталостного роста трещины). Особенностью зоны усталостного роста трещины является формирование субзеренной (фрагментированной) структуры. Размеры субзерен зависят от величины индукции магнитного поля и меняются от 0,56–0,87 мкм для образца, разрушенного в отсутствие магнитного поля, (рис. 6, а) до 0,47–0,65 мкм для образца, разрушенного в магнитном поле при $B = 0,5$ Тл (рис. 6, г).

Выполненные исследования показывают, что формирование субзеренной структуры в зоне усталостного роста трещины оказывает влияние на передвижение микротрещины. А именно, расстояние между усталостными бороздками соответствуют

размерам субзерен. Анализ результатов, приведенных на рисунках 5 и 6, свидетельствует о том, что усталостные бороздки в поверхностном слое располагаются на расстоянии, соответствующем размеру субзерен. Следовательно, в зоне усталостного роста трещины границы субзерен оказывают тормозящее влияние на движущуюся микротрещину.

В совокупности выявленные в результате анализа поверхности разрушения факты свидетельствуют о более высокой сопротивляемости материала распространению усталостной трещины и об увеличении ресурса его работоспособности при усталостных испытаниях в магнитном поле, что коррелирует с данными по увеличению среднего количества циклов до разрушения образцов титана ВТ1-0. Однако, для развития гипотезы влияния слабых магнитных полей (величиной до 0,5 Тл) на деформационное поведение парамагнитных металлических материалов в условиях одновременного действия знакопеременных нагрузок и воздействия магнитными полями разной величины необходимы более углубленные структурные исследования. В связи с этим в дальнейшем планируется провести послойные электронно-микроскопические исследования тонкой структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры в зависимости от расстояния до поверхности разрушения технически чистого титана ВТ1-0, разрушенного при

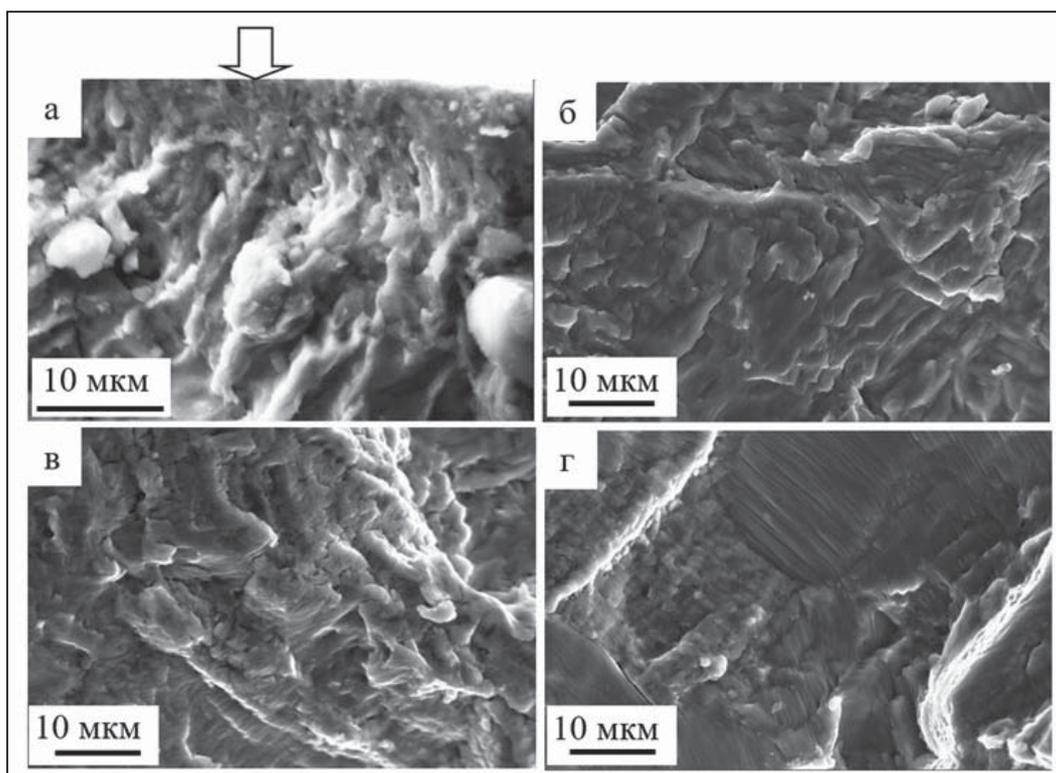


Рис. 6. Блочная (субзеренная) структура, формирующаяся в поверхностном слое титана в результате усталостного разрушения в постоянном магнитном поле: а – 0 Тл; б – 0,3 Тл; в – 0,4 Тл; г – 0,5 Тл. Стрелкой на (а) указана поверхность образца

многоцикловых усталостных испытаниях без применения магнитного поля и в постоянном магнитном поле разной величины.

Заключение

Выполнены многоцикловые усталостные испытания образцов титана ВТ1-0, осуществленные в условиях воздействия постоянным магнитным полем разной индукции и без него. Показано, что с увеличением магнитной индукции поля среднее количество циклов до разрушения образцов титана возрастает от $N = 121478$ ($B = 0$ Тл) до $N = 319828$ ($B = 0,5$ Тл). Таким образом, применение постоянного магнитного поля с индукцией 0,3, 0,4 и 0,5 Тл приводит к кратному увеличению усталостной долговечности титана ВТ1-0 на 64, 123 и 163 %, соответственно.

Фрактографический анализ поверхности разрушения технически чистого титана в условиях многоциклового нагружения позволяет заключить, что независимо от режима усталостных испытаний структура разрушенных образцов имеет три характерные зоны: зону усталостного роста трещины, зону ускоренного роста трещины и

зону долома. Установлено, что ширина зоны усталостного роста трещины зависит от индукции магнитного поля и достигает максимальных значений ($h = 264$ мкм) при $B = 0,4$ Тл. При усталостных испытаниях без магнитного поля $h = 182$ мкм, что указывает на увеличение критической длины трещины (ширины зоны усталостного роста трещины) в 1,45 раза. Показано, что среднее расстояние между усталостными бороздками в образцах титана также зависит от величины магнитной индукции магнитного поля и снижается от 0,78 мкм при $B = 0,0$ Тл до 0,49 при $B = 0,5$ Тл. Следовательно, критическая длина трещины в образце титана, разрушенном в магнитном поле (при $B = 0,5$ Тл), в 1,5 раза меньше, чем в образце, разрушенном в отсутствие поля.

Особенностью зоны усталостного роста трещины титана ВТ1-0 является формирование субзеренной (фрагментированной) структуры. Размеры субзерен образца, разрушенного без применения поля, составляют 0,56–0,87 мкм, а образца, разрушенного при циклических испытаниях в магнитном поле при $B = 0,4$ Тл, – 0,67–1,1 мкм. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что усталостные бороздки в поверхностном слое располагаются

на расстоянии, соответствующем размеру субзерен. Следовательно, в зоне усталостного роста трещины границы субзерен оказывают тормозящее влияние на движущуюся микротрещину.

Таким образом, выявленные факты свидетельствуют о более высокой сопротивляемости распространению усталостной трещины и об увеличении ресурса работоспособности титана VT1-0 при усталостных испытаниях в постоянном магнитном поле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Russian Science Foundation) № 21-79-00118, <https://rscf.ru/project/21-79-00118>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Peralta P., Laird C. *Fatigue of Metals. In: Physical Metallurgy (Fifth Edition)* / Ed. by: D.E. Laughlin, K. Hono. Amsterdam: Elsevier, 2014. Pp. 1765–1880.
2. Li G., Sun C. High-temperature failure mechanism and defect sensitivity of TC17 titanium alloy in high cycle fatigue // *Journal of Materials Science & Technology*. 2022. Vol. 122. Pp. 128–140.
3. Jung J., Ju Y., Morita Y., Toku Y. Effect of pulsed electric current on the growth behavior of fatigue crack in Al alloy // *Procedia Structural Integrity*. 2016. Vol. 2. Pp. 2989–2993.
4. Mohin M., Toofanny H., Babutskyi A., Lewis A., Xu Y. Effect of electromagnetic treatment on fatigue resistance of 2011 aluminum alloy // *Journal of Multiscale Modelling*. 2016. Vol. 7(3). No. 1650004.
5. Huang S., Sheng J., Zhou J.Z., Lu J.Z., Meng X.K., Xu S.Q., Zhang H.F. On the influence of laser peening with different coverage areas on fatigue response and fracture behavior of Ti–6Al–4V alloy // *Engineering Fracture Mechanics*. 2015. Vol. 147. Pp. 72–82.
6. Ren X., Chen B., Jiao J., Yang Y., Zhou W., Tong Z. Fatigue behavior of double-sided laser shock peened Ti-6Al-4V thin blade subjected to foreign object damage // *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol. 121. No. 105784.
7. Sun R., Li L., Guo W., Peng P., Zhai T., Che Z., Li B., Guo C., Y. Zhu Laser shock peening induced fatigue crack retardation in Ti-17 titanium alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 737. Pp. 94–104.
8. Qi K., Yang Y., Liang W., Jin K., Xiong L. Effect of magnetic field on the microstructure and wear properties of TiB₂/metal composite layers synthesized in situ by laser cladding on Ti–6Al–4V alloy // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47 (20). Pp. 29463–29474.
9. Donii O., Narizhna T., Voron M., Berest D. Influence of the external magnetic field on the structure and properties of the hypereutectic aluminum-silicon alloy // *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations*. 2018. Vol. 4(3). Pp. 79–82.
10. Goins P.E., Murdoch H.A., Hernández-Rivera E., Tschopp M.A. Effect of magnetic fields on microstructure evolution // *Computational Materials Science*. 2018. Vol. 150. Pp. 464–474.
11. Vdovin K.N., Dubsky G.A., Deev V.B., Egorova L.G., Nefediev A.A., Prusov E.S. Influence of a Magnetic Field on Structure Formation during the Crystallization and Physicomechanical Properties of Aluminum Alloys // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2019. Vol. 60 (3). Pp. 51–57.
12. Cai Q., Zhai C., Luo Q., Zhang T.-Y. Effects of magnetic field on the microstructure and mechanical property of Mg-Al-Gd alloys // *Materials Characterization*. 2019. Vol. 154. Pp. 233–240.
13. Li G.R., Li Y.M., Wang F.F., Wang H.M. Microstructure and performance of solid TC4 titanium alloy subjected to the high pulsed magnetic field treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 644. Pp. 750–756.
14. 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. Pp. 345–354.
15. 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.
16. Сейдаметов С.В., Лоскутов С.В., Щетинина М.О. Магнитопластический эффект в условиях испытаний на кинетическое индентирование // *Металлофизика и Новейшие Технологии*. 2015. Т. 37. № 5. С. 615–624. Sejdametov S.V., Loskutov S.V., Shchetinina M.O. Magnitoplasticheskiy effekt v usloviyah ispytaniy na kineticheskoe indentirovanie [Magnetoplastic effect under conditions of tests for kinetic indentation]. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii* [Metallophysics and Newest Technologies]. 2015. Vol. 37. № 5. Pp. 615–624.
17. Сейдаметов С.В., Лоскутов С.В. Влияние импульсной электромагнитной обработки на структурные перестройки сплава титана VT3-1 // *Журнал физики и инженерии поверхности*. 2016. Т. 1. № 1. С. 4–8. Sejdametov S.V., Loskutov S.V. Vliyanie impul'snoy elektromagnitnoy obrabotki na strukturnye perestroyki splava titana VT3-1 [Influence of pulsed electromagnetic processing on structural

- rearrangements of titanium alloy VT3-1]. *Zhurnal fiziki i inzhenerii poverhnosti* [Journal of Physics and Surface Engineering]. 2016. Vol. 1. № 1. Pp. 4–8.
18. Pang J.C., Li S.X., Wang Z.G., Zhang Z.F. General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials // *Materials Science and Engineering A*. 2013. Vol. 564. Pp. 331–341.
 19. Kyoung J.C., Seung C.Y., Junhyuk H., Kim J.H., Jeong S.Y., Choi Y.S. Fatigue behavior of AISI 8620 steel exposed to magnetic field // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 764. Pp. 73–79.
 20. Gu Q., Huang X., Xi J., Gao Z. The Influence of Magnetic Field on Fatigue and Mechanical Properties of a 35CrMo Steel // *Metals*. 2021. Vol. 11(4). P. 542.
 21. Akram S., Babutskyi A., Chrysanthou A., Montalvão D., Pizurova N. Effect of Alternating Magnetic Field on the Fatigue Behaviour of EN8 Steel and 2014-T6 Aluminium Alloy // *Metals*. 2019. Vol. 9. P. 984.
 22. Zaguliaev D.V., Konovalov S.V., Shlyarov V.V., Chen X. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals // *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6(9). Pp. 096523.
 23. Zaguliaev D.V., Barannikova S.A., Shlyarov V.V., Anuchina E., Konovalov S.V. Effect of the 0.3 T magnetic field on the microhardness of commercially pure VT1-0 titanium // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1783. Pp. 020233.
 24. Шляров В.В., Загуляев Д.В. Влияние магнитных полей на процесс пластической деформации цветных металлов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16. № 3. С. 394–398. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V. Vliyanie magnitnyh polej na process plasticheskoy deformacii cvetnyh metallov [Influence of magnetic fields on the process of plastic deformation of non-ferrous metals]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya* [Fundamental problems of modern materials science]. 2019. Vol. 16. № 3. Pp. 394–398.
 25. Aksenova K.V., Zaguliaev D.V., Konovalov S.V., Shlyarov V.V., Ivanov Yu.F. Influence of constant magnetic field upon fatigue life of commercially pure titanium // *Materials*. 2022. V. 15. N. 6926. Pp. 1–10.
 26. Терентьев В.Ф. *Усталость металлов*. М.: Наука, 2015. 312 с. Terent'ev V.F. *Ustalost' metallov* [Metal fatigue]. Moscow: Nauka, 2015. 312 p.
 27. Kotsanda S. *Fatigue fracture of metals*. М.: Metallurgy, 1990. 623 p.
 28. Anderson T.L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. USA: CRC Press. 2005. 688 p.
 29. McEvily A.J., Matsunaga H. On Fatigue Striations // *Transaction B: Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 17. No. 1. Pp. 75–82.

Сведения об авторах

Аксёнова Крестина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля

Загуляев Дмитрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля

Шляров Виталий Владиславович, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, заведующий сектором отдела информационно-аналитического мониторинга и отчетности

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
654007, г. Новокузнецк, Российская Федерация, ул. Кирова, 42

Information about authors

Aksenova Krestina V., Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel

Zaguliaev Dmitriy V., Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel

Shlyarov Vitalij V., Postgraduate Student of the Department of Natural Sciences them. prof. V.M. Finkel, Head of the Sector of the Department of Information and Analytical Monitoring and Reporting

Siberian State Industrial University
654007, Novokuznetsk, Russian Federation, st. Kirova, 42