

ИЗМЕНЕНИЕ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0, ПОДВЕРГНУТОГО ТОКОВОМУ ИМПУЛЬСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

И.А. Комиссарова, Д.А. Косинов, С.В. Коновалов, А.В. Феоктистов,
Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов

Выполнено исследование влияния токовой импульсной обработки титанового сплава VT1-0 на изменение его усталостного ресурса и проведен сравнительный анализ структуры и фазового состава. Установлено, что токовая импульсная обработка приводит к увеличению усталостной долговечности в ~1,3 раза. Методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии тонких фольг выполнен анализ изменения структуры и фазового состава образцов, подвергнутых токовой импульсной обработке и усталостным испытаниям до разрушения. Установлено, что структура поверхностного слоя титана, разрушенного в результате усталостных испытаний, имеет тонкий (до 4,5 мкм) поверхностный слой с нанокристаллической структурой со средним размером зерен 58,6 нм. Зерна формируют разориентированные друг относительно друга слои, расположенные параллельно поверхности образца. Нанокристаллическая структура отмечается на глубине вплоть до 7-8 мкм, она формируется в стыках исходных зерен титана. Прилегающий слой характеризуется наличием большого количества изгибных экстинкционных контуров. Токовая импульсная обработка титанового сплава приводит к существенному увеличению до 422,7 нм размеров кристаллитов α -Ti поверхностного слоя материала, что обусловлено процессами рекристаллизации; способствует уменьшению количества источников внутренних полей напряжений в поверхностном слое материала, что обеспечивает снижение потенциально опасных мест трещинообразования; приводит к значительному увеличению размеров частиц окисной фазы, образующихся в поверхностном слое образцов при усталостных испытаниях.

Ключевые слова: титановый сплав VT1-0, токовая импульсная обработка, многоцикловая усталость, усталостный ресурс, структура.

В современных условиях эксплуатации машин и конструкций проблемы повышения прочности, ресурса, живучести и долговечности материалов выдвигаются в число основных задач. Наиболее ответственные и уникальные изделия, машины и конструкции эксплуатируются в режимах циклических деформаций, определяющих разрушение даже при незначительных нагрузках. Поэтому актуальной является проблема предотвращения усталостных разрушений ответственных деталей (увеличения срока их службы), особенно в тех отраслях, где возникновение аварий ведет к катастрофическим последствиям [1, 2].

Для повышения усталостной долговечности металлических материалов используют различные способы упрочняющей обработки. В последние годы перспективными являются работы, направленные на создание, изучение, совершенствование и практическое внедрение технологических методов поверхностного упрочнения, использующих высококонцентрированные источники энергии, включающие

ионные, плазменные, лазерные и электронные пучки, обеспечивающие формирование в поверхностном слое высокопрочных наноструктур.

Одним из перспективных методов целенаправленной модификации структурно-фазового состояния металлических материалов является воздействие мощными импульсными токами. Такое воздействие обладает большими возможностями контроля и регулирования количества подводимой энергии, создания большой площади воздействия концентрированного потока энергии на обрабатываемый материал, малыми коэффициентами отражения энергии, более высокой концентрацией энергии в единице объема материала, а соответственно и большими возможностями перевода материала в высоконерновесное состояние. Высокая энергетическая эффективность, более высокая однородность плотности энергии по сечению потока и высокая частота их следования выгодно отличают импульсные электрические токи от других спосо-

бов энергетического воздействия при потенциальном использовании тех и других в технологических целях [3-7].

В связи с вышеотмеченным целью настоящей работы являлось исследование влияния токовой импульсной токовой обработки титанового сплава ВТ1-0 на изменение его усталостного ресурса и проведение сравнительного анализа структуры и фазового состава.

Образцы с размерами 12x4x130 мм с концентратором напряжений радиусом 20 мм были выполнены по ГОСТ 25.502-79. Усталостные испытания были проведены при комнатной температуре по схеме консольного изгиба. Частота нагружения составляла 10 Гц. Усталостные испытания были выполнены по двум схемам: в обычном режиме и при проведении токовой импульсной обработки.

Ранее в наших работах [8-10] было показано, что в случае воздействия токовыми импульсами на промежуточной стадии усталостного нагружения (эта стадия соответствует резкому уменьшению скорости ультразвуковых волн в образцах) происходит увеличение числа циклов до разрушения. В связи с этим в настоящей работе выбрана такая же последовательность действий. В дальнейшем исследование было проведено с двумя группами образцов: разрушенными без токового воздействия и разрушенными после промежуточного токового воздействия.

Параметры токового воздействия были следующие: частота токовых импульсов – 70 Гц, длительность воздействия – 2 мин, амплитуда токовых импульсов – 2 кА. Обработка токовыми импульсами проводилась при достижении образцами 180000 циклов нагружения. Всего было в каждом состоянии разрушено по 10 образцов. Такое воздействие привело к увеличению числа циклов до разрушения с 281333 ± 27400 до 359532 ± 19050 . Следовательно, усталостная долговечность образцов увеличилась в ~1,3 раза. Отметим, что токовая импульсная обработка способствовала уменьшению разброса данных.

Исследование структуры и фазового состава поверхностного слоя образцов, разрушенных в результате усталостных испытаний, осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (JEM 2100F, JEOL). Фольги готовили из пластинок, вырезанных из разрушенных образцов параллельно поверхности излома в непосредственной близости от нее.

Структура поверхностного слоя титана, разрушенного в результате усталостных испытаний, имеет тонкий (до 4,5 мкм) поверхностный слой с нанокристаллической структурой.

Средний размер зерен, формирующих данный слой, составляет $58,6 \pm 21,5$ нм. Распределение зерен по размерам близко к логарифмически нормальному (рисунок 1). Зерна формируют разориентированные друг относительно друга слои, расположенные параллельно поверхности образца. Толщина таких слоев, в большинстве случаев, соответствует среднему размеру зерен.

Прилегающий к наноструктурированному поверхностному слою объем материала имеет пластинчатую структуру и характеризуется наличием большого количества изгибных экстинкционных контуров (рисунок 1, а). Данный факт свидетельствует о высоком уровне внутренних полей напряжений, приводящих к изгибу кручению кристаллической решетки материала [11, 12]. Следует отметить, что подобная нанокристаллическая структура отмечается на глубине вплоть до 7-8 мкм и формируется она в стыках исходных зерен титана.

Методами дифракционной электронной микроскопии с применением темнопольной методики и последующего индицирования микроэлектроннограмм были проведены исследования фазового состава поверхностного наноструктурированного слоя образцов, разрушенных в результате усталостных испытаний. Полученные при этом результаты представлены на рисунке 2.

Анализ микроэлектроннограммы, представленной на рисунке 2, а, выявил кольцевой характер ее строения. Данное обстоятельство свидетельствует, во-первых, о малом размере кристаллитов, формирующих микроэлектроннограмму, и, во-вторых, о большеугловой разориентации данных кристаллитов [13, 14], т.е. о формировании зеренно-субзеренной структуры в поверхностном слое технически чистого титана в результате усталостных испытаний.

Индицирование микроэлектроннограммы, представленной на рисунке 2, б, свидетельствует о многофазном состоянии поверхностного слоя материала. Основной фазой является α -модификация титана, рефлекссы которой формируют кольцевую структуру. Следовательно, нанокристаллические зерна образованы α -модификацией титана. Темнопольный анализ поверхностного слоя в рефлексах кристаллической решетки α -титана выявил наличие крапчатого контраста в объеме кристаллитов. Данный факт может свидетельствовать о наличии в наноразмерных кристаллитах α -титана дефектной субструктуры.

Кроме рефлекссов α -титана на микроэлектроннограмме выявлены рефлекссы окисной фазы титана. Окислы титана располагаются в

ИЗМЕНЕНИЕ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ1-0, ПОДВЕРГНУТОГО ТОКОВОМУ ИМПУЛЬСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

основном вдоль границ кристаллитов α -титана; частицы имеют округлую форму, размеры частиц изменяются до 10 нм. Следует отметить, что частицы окисной фазы выявлены исключительно в поверхностном наноструктурированном слое образца.

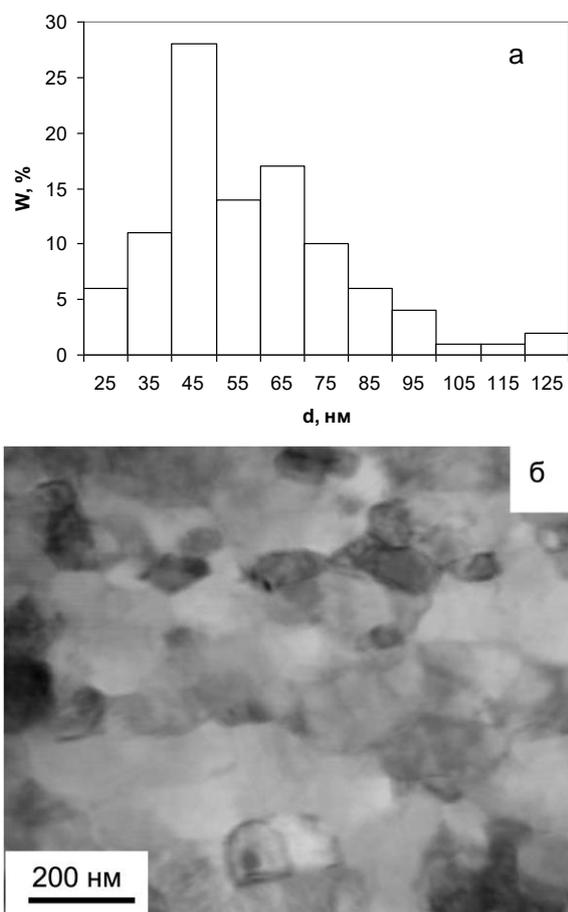
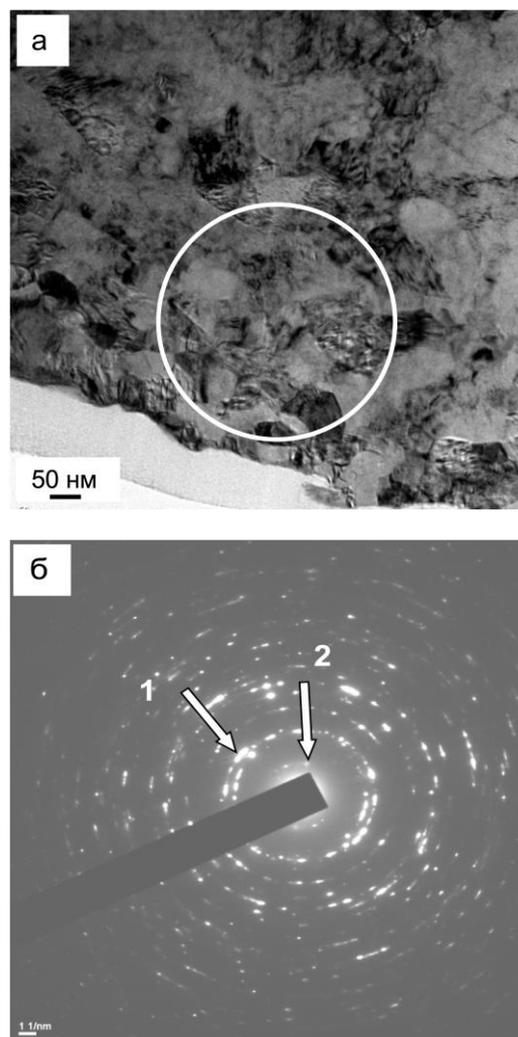


Рисунок 1 – Гистограмма (а) и электронно-микроскопическое изображение (б) зерен, формирующихся в поверхностном слое образца, разрушенного в результате усталостных испытаний

В объеме образца частиц окисной фазы не обнаружены. По нашему мнению, формирование частиц окисной фазы является результатом проникновения атомов кислорода по мало- и большеугловым границам кристаллитов в процессе усталостных испытаний материала.

Вторым объектом электронно-микроскопических микродифракционных исследований были образцы, усталостные испытания которых осуществляли при проведении на промежуточной стадии усталостного нагружения токовой импульсной обработки. Установлено, что в результате усталостных

испытаний в сравнительно тонком (не более 4 мкм) поверхностном слое образцов формируется субмикроструктурная структура, средний размер кристаллитов которой $422,7 \pm 400$ нм (рисунок 3).



а – светлопольное изображение поверхностного слоя (нижняя граница рисунка соответствует поверхности образца); б – микроэлектронограмма, полученная с участка, выделенного на (а) овалом

Рисунок 2 – Структура поперечного сечения образца, разрушенного в результате усталостных испытаний

Следовательно, воздействие токовыми импульсами образцов в процессе усталостных испытаний приводит к многократному увеличению размеров кристаллитов поверхностного слоя.

Следующей особенностью зеренной структуры поверхностного слоя является

сравнительно большой разброс зерен по размерам (рисунок 3, а). По нашему мнению, причиной этому являются процессы рекристаллизации материала, имеющие место при обработке токовыми импульсами. Ранее подобный эффект был обнаружен при исследовании образцов аустенитной стали, подвергнутой усталостным испытаниям при токовой импульсной обработке [8].

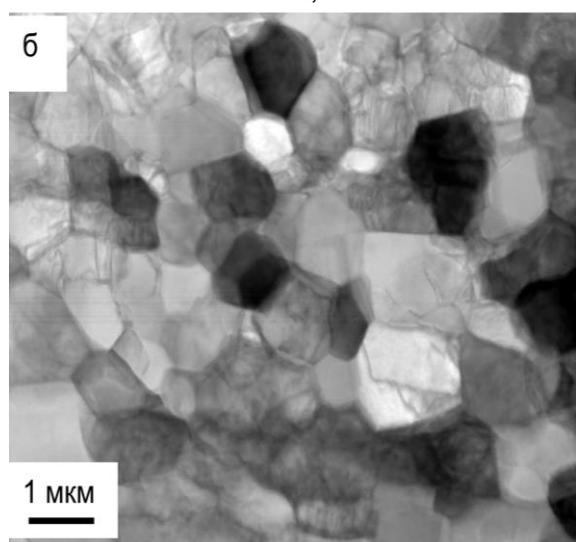
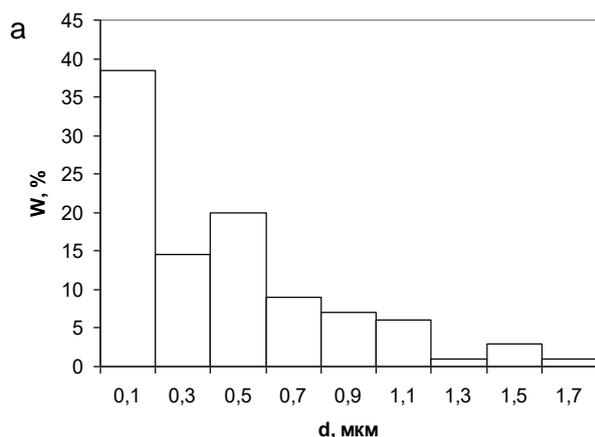


Рисунок 3 – Гистограмма (а) и электронно-микроскопическое изображение (б) зерен, формирующихся в поверхностном слое образца, разрушенного в результате усталостных испытаний. Испытания проводили в условиях токовой импульсной обработки

Еще одной особенностью образцов, разрушенных в результате усталостных испытаний в условиях токовой импульсной обработки, является сравнительно низкий уровень изгиба кручения кристаллической решетки материала. Из анализа микрофотографий структуры выявлено незначительное количество

изгибных экстинкционных контуров, присутствующих в поверхностном слое разрушенных образцов. Следовательно, токовая импульсная обработка образцов в процессе усталостных испытаний способствует снижению количества источников (концентраторов) внутренних полей напряжений в поверхностном слое материала.

Фазовый анализ поверхностного слоя образцов, разрушенных в результате усталостных испытаний в условиях токового импульсного воздействия выявил формирование многофазной структуры, подобной структуре образцов, рассмотренных выше. А именно, основной фазой исследуемого слоя является α -титан, вторым фазами являются частицы окислов титана.

Установлено, что частицы окисной фазы располагаются вдоль границ зерен и субзерен α -титана. Размеры частиц изменяются в пределах от 10 - 35 нм, что заметно больше размеров частиц окисной фазы, формирующихся в поверхностном слое титана, подвергнутого усталостным испытаниям без токового импульсного воздействия.

Как уже отмечалось выше, усталостные испытания образцов сопровождаются формированием в зернах поверхностного слоя дефектной субструктуры. Подобного вида дефектная субструктура формируется и в зернах α -титана, разрушенных при усталостных испытаниях в условиях токового импульсного воздействия. Данная субструктура выявляется и на светлопольных и на темнопольных изображениях структуры материала.

Таким образом, выполнены усталостные испытания образцов технически чистого титана марки ВТ1-0. Установлено, что токовая импульсная обработка образцов, осуществляемая на промежуточной стадии испытаний, приводит к увеличению усталостной долговечности материала в $\approx 1,3$ раза относительно образцов без такой обработки. Выполнены электронно-микроскопические микродифракционные исследования фазового состава и дефектной субструктуры поверхностного слоя образцов, разрушенных в условиях усталостных испытаний и выявлены физические механизмы, ответственные за увеличение усталостной долговечности материала в условиях токовой импульсной обработки. Показано, что энергетическое воздействие на образцы, во-первых, сопровождается многократным увеличением размеров кристаллитов α -титана поверхностного слоя материала, что обусловлено процессами рекристаллизации; во-вторых, способствует снижению количества источников (концентраторов) внутренних полей

ИЗМЕНЕНИЕ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ1-0, ПОДВЕРГНУТОГО ТОКОВОМУ ИМПУЛЬСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

напряжений в поверхностном слое материала, что обеспечивает снижение потенциально опасных мест трещинообразования; в-третьих, приводит к существенному увеличению размеров частиц окисной фазы, формирующихся в поверхностном слое образцов технически чистого титана при усталостных испытаниях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №16-32-60048_мол_а_дк и №16-58-00075-Бел-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интермет инжиниринг, 2002. – 287 с.
2. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. – М.: Наука, 1989. – 230 с.
3. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Абрамов Ю.С. и др. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
4. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 590 с.
5. Юрьев В.А., Баранов Ю.В., Столяров В.В., Шульга В.А. Костина И.В. Влияние электропластической обработки на структуру алюминий-литиевого сплава 1463 // Известия РАН. Сер. физическая. – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1317-1319.
6. Столяров В.В. Роль внешних воздействий в наноструктурных титановых сплавах // Известия РАН. Серия Физическая. – 2012. – Т. 76, №1. – С. 108-113.
7. Столяров В.В. Влияние химического и фазового состава на проявление электропластического эффекта в титановых сплавах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2014. – Т. 78, № 3. – С. 356-358.
8. Соснин О.В., Громов В.Е., Козлов Э.В., Иванов Ю.Ф. и др. Усталость сталей при импульсном токовом воздействии. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 464 с.
9. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Эволюция дислокационной структуры при усталости коррозионнстойкой стали с промежуточной электроимпульсной обработкой // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 4. – С. 7-11.
10. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Громова А.В. Формирование градиентной субструктуры в марганцовистой аустенитной стали при усталостном нагружении и электроимпульсной обработке // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 4. – С.72 – 78.
11. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., попова Н.А., Коновалов С.В., Конева Н.А. Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформированной стали. – Новокузнецк: Полиграфист. – 2016. –

510 с.

12. Конева Н.А., Киселева С.Ф., Попова Н.А. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. – Deutschland: Lamp Lambert Academic Publishing, 2017. – 148 с.

13. Иванов Ю.Ф., Пауль А.В., Конева Н.А., Козлов Э.В. Электронно-микроскопический анализ нанокристаллических материалов // ФММ. – 1991. - №7. – С. 206-208.

14. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.

Комиссарова Ирина Алексеевна, аспирант Сибирского государственного индустриального университета; тел. 8 (3843) 784367. E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru.

Косинов Дмитрий Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета; тел. 8 (3843) 784367. E-mail: Kosinov@isk-kps.ru.

Коновалов Сергей Валерьевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; профессор Уханьского текстильного университета; тел. 8 (846) 267-46-40. E-mail: ksv@ssau.ru.

Феоктистов Андрей Владимирович, д.т.н., доцент, проректор по учебной работе – первый проректор Сибирского государственного индустриального университета; тел. 8 (3843) 46-35-80. E-mail: utu@sibsiu.ru.

Иванов Юрий Федорович, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН. E-mail: yufi55@mail.ru

Громов Виктор Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета; тел. 8(3843)46-22-77. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru