

**ВЛИЯНИЕ КРИВИЗНЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ
ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 НА МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ**

^{1,2}Р.Р. Хайруллин, ¹Ю.С. Бордулев, ²И.В. Власов

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. В.Е. Панин

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: hairullin@list.ru

**EFFECT OF THE Ti-6Al-4V ALLOY SPECIMENS CRYSTAL LATTICE CURVATURE WITHIN
SURFACE LAYERS ON FATIGUE FAILURE MECHANISMS**

^{1,2}R.R. Hairullin, ¹Yu.S. Bordulev, ²I.V. Vlasov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.E. Panin

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute of strength physics and material science SB RAS, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634055

E-mail: hairullin@list.ru

***Abstract.** In the present work the role of the crystal lattice curvature in fatigue failure of Ti-6Al-4V alloy specimens was discussed. The effect of the specimens ultrasonic treatment and further electrolytic hydrogenation on their fatigue properties was revealed. It was found that the crystal lattice curvature resulted in the fatigue durability increase due to a grain boundary sliding at the boundaries of strongly dispersed phases as well as the decrease one by reason of the brittle intermetallic phase of Ti_3Al precipitation or the stabilization by hydrogen of the strong BCC β phase depending on the Ti-6Al-4V specimens structure and phase composition.*

Введение. Практически во всех отраслях строительства и техники регулярно происходят поломки машинного оборудования и конструкций вследствие явления усталости материала. В результате, создается угроза жизни и здоровью людей, а также наносятся огромные экономический и экологический ущербы. Авиация и судостроение – одни из самых подверженных усталостному разрушению отраслей, важнейшим критерием выбора материала в которых является высокая удельная прочность. Именно поэтому широкое применение в указанных отраслях находят промышленные титановые сплавы, такие как ВТ6 и ВТ23. Для повышения сопротивления усталостному разрушению конструкционных материалов активно разрабатываются технологии их обработки: нанесение упрочняющих покрытий, химико-термическая обработка, ионная имплантация и др. Особое место занимает ультразвуковая ударная обработка (УЗО), характеризующаяся относительной простотой технической реализации и низкой себестоимостью. Ранее было показано, что обработка ультразвуком технически чистого титана ВТ1-0 наноструктурирует поверхность и создает в поверхностном слое кривизну кристаллической решетки. В условиях последующего циклического нагружения затрудняется образование кривизны кристаллической решетки в сильно диспергированном α -титане. В результате, понижается количество микропор, возникающих в процессе коалесценции неравновесных вакансий, и, как следствие,

усталостная долговечность материала возрастает в 4 раза. Возникает вопрос, а как же влияет кривизна кристаллической решетки на усталостную долговечность промышленного титанового сплава ВТ6, обладающего более высокими исходными прочностными свойствами по сравнению с технически чистым титаном? Для ответа на этот вопрос необходимо всесторонне исследовать влияние УЗО на усталостные свойства сплава ВТ6. Кроме того, учитывая, что титан и его сплавы при температурах свыше 500°C очень чувствительны к водороду, приводящему к охрупчиванию, а конструкции из титана подвергаются свариванию, то необходимо дополнительно изучить влияние наводороживания на усталостные свойства сплава ВТ6, подвергнутого предварительной ударной ультразвуковой обработке.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследований применялись плоские образцы, вырезанные из листа промышленного титанового сплава марки ВТ6 толщиной 1 мм. Форма и размеры вырезанных образцов менялись в зависимости от метода исследований. Все образцы разделили на 2 партии. Первая партия образцов была подвергнута рекристаллизационному отжигу в вакууме при 800 °С в течение 2 часов, вторая – была обработана ударным ультразвуком мощностью в 600 Вт. Далее с половиной образцов ВТ6, подвергнутых ультразвуковой обработке, дополнительно провели электролитическое наводороживание в течение 1 ч. Все исследуемые образцы были испытаны на многоцикловую усталость на сервогидравлической испытательной машине BISS UTM 150 с частотой 20 Гц, максимальной нагрузкой 630 МПа, асимметрией цикла $R=0,1$. Микроструктуру образцов ВТ6 исследовали методом позитронной аннигиляции в режимах анализа временного распределения аннигиляции позитронов и анализа совпадений доплеровского уширения аннигиляционной линии (цифровой спектрометр кафедры общей физики ТПУ), а также методом просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп JEM-2100). Измерения микротвердости исследуемых образцов выполняли на микротвердомере “ПМТ-3” с нагрузкой 50 г.

Результаты. Образцы ВТ6 в рекристаллизованном состоянии характеризуются полосовой двухфазной структурой, состоящей из пластин ГПУ α -фазы и прослоек ОЦК β -фазы между ними. По данным метода позитронной аннигиляции в отожженном ВТ6 100% позитронов аннигилирует на бездефектной кристаллической решетке. Соответствующее время жизни позитронов в бездефектной решетке $\tau = 151$ пс. Микротвердость отожженных образцов ВТ6 составляет 270 кг/мм². В процессе циклической деформации образцов ВТ6 по механизму пластической дисторсии в условиях кривизны кристаллической решетки происходит образование неравновесных вакансий, которые, схлопываясь, формируют микропоры. Микропоры приводят к расслоению материала и способствуют возникновению трещин, что обуславливает процесс усталостного разрушения.

Дальнейшая обработка образцов ВТ6 ударным ультразвуком, приводит к выделению хрупкого интерметаллида Ti_3Al из α -фазы твердого раствора $Ti-Al$. Причиной образования новой фазы является кривизна кристаллической решетки. Экспериментально методом позитронной аннигиляции наличие кривизны в образцах ВТ6, подвергнутых УЗО, подтверждается существенным повышением концентрации вакансий с 10^{-10} вакансий/узел кр.решетки до 10^{-5} вакансий/узел кр.решетки. Поскольку при комнатной температуре термических вакансий с такой высокой концентрацией быть не может, то данные вакансии являются нетермическими или неравновесными и, следовательно, образовались из-за кривизны кристаллической решетки. Формирование кривизны приводит к заполнению вакантных

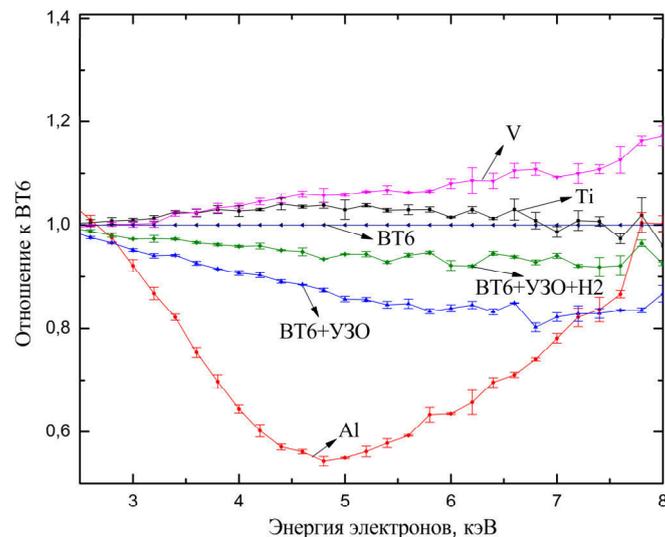


Рис. 1. Кривые распределения энергии электронов в исследуемых образцах относительно эталонного образца бездефектного ВТ6

связующих d-состояний сближенных ионов Ti s-p-электронами ионов Al (для экранировки избыточного положительного заряда) и образованию наночастиц Ti_3Al . Данный результат экспериментально подтверждается методом позитронной аннигиляции из анализа совпадений доплеровского уширения аннигиляционной линии. Как видно из рис. 1, кривая распределение энергии электронов в образцах ВТ6, подвергнутых УЗО, сместилась ближе к соответствующей кривой для деформированного алюминия. Это говорит о том, что аннигиляция позитронов происходит на возбужденных s-p-электронах Al в наночастицах Ti_3Al . Ультразвуковая обработка ВТ6 сильно диспергирует структуру. В результате, развивается кривизна кристаллической решетки, которая при дальнейшем циклическом нагружении приводит к зернограничному скольжению на интерфейсах между фазами α , β -и Ti_3Al . Зернограничное скольжение через кривизну кристаллической решетки генерирует источники дислокаций в основные α и β -фазы и вызывает их пластическую деформацию, что подтверждается уменьшением микротвердости образцов ВТ6, подвергнутых УЗО, до 220 кг/мм^2 . Однако, вследствие выпадения хрупкой фазы Ti_3Al ультразвуковая обработка ВТ6 повысила усталостную долговечность только в 1,3 раза.

Наводораживание образцов ВТ6, подвергнутых предварительной УЗО, привело к уменьшению времени жизни позитронов с 224 пс до 215 пс вследствие того, что неравновесные вакансии захватили атомы водорода, тем самым, повысив объемную электронную плотность. Водород, адсорбируясь в образованных кривизной кристаллической решетки неравновесных вакантных узлах прочной ОЦК β -фазы, стабилизировал её и заблокировал зернограничное скольжение на интерфейсах между α - и β -фазами. В результате микротвердость образцов повысилась до 370 кг/мм^2 , а усталостная долговечность понизилась в 4 раза.

Заключение. Таким образом, кривизна кристаллической решетки является главной движущей силой в пластической деформации и разрушении образцов титановых сплавов ВТ6, находящихся в различном структурном состоянии. В зависимости от структурно-фазового состава образцов ВТ6 кривизна кристаллической решетки обуславливает как увеличение усталостной долговечности за счет зернограничного скольжения на границах сильно диспергированных фаз, так и её уменьшение вследствие выпадения хрупкой интерметаллидной фазы Ti_3Al или стабилизации водородом прочной ОЦК β -фазы.