

С. А. Кунавин

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ AL И TI

Приведены обобщенные результаты исследований стандартных механических свойств и усталостной прочности материалов на основе Ti и Al с ультрамелкозернистой структурой, полученной методами интенсивной пластической деформации. Наблюдается существенное возрастание прочностных характеристик (на $\approx 80\%$) и предела ограниченной выносливости.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, механические свойства, предел выносливости, механизмы разрушения.

Введение

Современные исследования показывают, что разработка и совершенствование технологий получения алюминиевых и титановых сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой позволяют в широком диапазоне изменять их физико-механические и эксплуатационные свойства. Одним из эффективных способов получения УМЗ структуры является использование таких методов интенсивной пластической деформации (ИПД) как метод кручения под высоким давлением (ИПДК) [1] и равноканального углового прессования (РКУП) [2] и РКУП в комбинации с экструзией, прокаткой [3, 4].

Наиболее востребованными в настоящее время являются ультрамелкозернистые материалы на основе алюминия и титана технической чистоты и их сплавы.

Титан и его сплавы благодаря высокой коррозионной стойкости и биосовместимости широко используются для изготовления имплантов в остеосинтезе, стоматологии, травматологии [5]. Наиболее широко распространенными биоматериалами являются технически чистый титан и его сплав Ti-6Al-4V (BT6). При этом титановый сплав, обладая заметно более высокой прочностью по сравнению с чистым титаном, может быть лучшим выбором для конструкций, подвергающихся высоким статическим и усталостным нагрузкам. Вместе с тем, чистый титан предпочтительнее его сплавов в случае очень долгого нахождения в теле человека ввиду отсутствия легирующих элементов, оказывающих вредное влияние на ткани. Проблема обеспечения биологической совместимости, наряду с сохранением высокой прочности и сопротивляемости усталостным нагрузкам, является достаточно актуальной в современной медицине. В комплексе принципиально важных для практического применения свойств особое место занимает усталость, таким чувствительная ко многим структурным особенностям материалов как размер зерна, соотношение и морфология фаз, плотность и распределение дислокаций, тип кристаллической решетки, внутренние напря-

жения, наличие, тип и распределение примесей и др. [6-10]. В недавних работах показано, что УМЗ материалы, в том числе титан, демонстрируют хороший потенциал для повышения усталостной долговечности, что является следствием значительного повышения напряжения течения и статической прочности.

В данной работе проведен обобщенный анализ результатов исследований [11,12], влияния УМЗ структуры на усталостные свойства CP Ti Grade 4, полученного с использованием РКУП в комбинации с традиционной термомеханической обработкой. В качестве объекта сравнения был использован титановый сплав Ti-6Al-4V ELI медицинского назначения после традиционной обработки и алюминиевого сплава типа 6061, полученного методом ИПДК.

Материалы и методы исследований

Титан. Для проведения исследований были использованы горячекатаные прутки диаметром -25 мм из технически чистого титана Grade 4 (мас. %): Ti – основа; C – 0,052; O₂ – 0,34; Fe – 0,3; N – 0,015.

Заготовки CP Ti Grade 4 подвергались РКУП по режиму $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, угол 90° , маршрут Bc, 8 проходов и последующей обработке кузнечной протяжкой и волочением с суммарной накопленной деформацией около 80 %. В результате комбинированной обработки прутки имели длину 800 мм и диаметр 7 мм. Исследования микроструктуры заготовок на промежуточных стадиях обработки проводились методами световой и просвечивающей электронной микроскопии. Для определения размера зерна α -фазы использовали метод количественной металлографии. Механические испытания на растяжение выполнены при комнатной температуре на машине Instron со скоростью нагружения 1 мм/мин на стандартных образцах с диаметром рабочей части 3 мм.

Образцы из медицинского сплава Ti-6Al-4V ELI со следующим химическим составом (%мас): Ti – основа, Al – 6,0; V – 4,2; Fe – 0,2; C – 0,001; O₂ – 0,11; N₂ – 0,0025; H₂ – 0,002 использовались после стандартной упрочняющей обработки

(после горячей прокатки и последующего отжига при 700 °С).

Усталостные испытания проводили на гладких образцах с корсетной рабочей частью и образцах с надрезом в условиях повторного растяжения с частотой $f = 20$ Гц, коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$ при комнатной температуре на воздухе. База испытаний составляла $N_0 = 10^6$ циклов. При испытаниях образцов с надрезом теоретический коэффициент концентрации составил $K_T = 2,8$. Рабочая поверхность образцов подвергалась шлифовке и механической полировке.

Алюминий. Образцы изготавливались из алюминиевого сплава типа 6061 в двух состояниях: исходном – обработка по режиму Т6 (6061-Т6); упрочненном (после ИПДК) с УМЗ структурой (средний размер зерна ≈ 160 нм) (6061-Н).

Стандартные механические свойства сплава 6061 определялись на плоских образцах с гладкой рабочей частью (средние значения характеристик приведены в табл. 1). Циклические испытания проводились на плоских образцах с корсетной рабочей частью в условиях повторного растяжения. Частота изменения циклической нагрузки $f = 20$ Гц. База испытаний $N_0 = 10^6$ циклов. Минимальная ширина в центре рабочей части образца равнялась в среднем $\approx 2,0$ мм (толщина образцов $t \approx 1,0$ мм). Теоретический коэффициент концентрации в минимальном сечении рабочей части образца составил $\approx 1,2$. Результаты усталостных испытаний: средние значения максимального циклического напряжения – $(\sigma_H)_{max}$ и числа циклов до разрушения – N_p приведены в табл. 2.

Экспериментальные результаты исследования и их обсуждение.

Титан. Микроструктура и свойства образцов перед усталостными испытаниями. Микроструктура титана Grade 4 в состоянии поставки представлена в поперечном и продольном сечениях равноосными зернами со средним размером около 25-30 мкм (рис. 1, а). На рис. 1, б-г представлена микроструктура прутков после РКУП и термомеханической обработки. Микроструктура в поперечном сечении характеризуется равноосными зернами размером 150 нм, объемная доля которых со-

ставляет до 70 % (рис. 1, б). В продольном сечении зерна вытянуты вдоль оси деформации в соотношении длины и толщины 1:6, внутренняя область которых разбита субзеренными малоугловыми границами со средним размером фрагментов около 150-200 нм.

На рис. 2 представлена микроструктура прутков Ti-6Al-4V ELI, которая состоит преимущественно из глобулярных зерен α -фазы размером в среднем около 8 мкм в поперечном сечении и тонкопластинчатой β -превращенной структуры, которая в литературе часто называется бимодальной. Данная микроструктура в титановом сплаве формируется после традиционной горячей прокатки в $(\alpha+\beta)$ области.

В табл. 2 представлены механические свойства CP Ti Grade 4 в УМЗ и исходном КЗ состоянии, а также сплава Ti-6Al-4V ELI после растяжения при комнатной температуре. В результате обработки ИПД механические свойства УМЗ прутка из CP Ti Grade 4 имеют рекордные для данного материала значения за счет сильного измельчения структуры. Прочность УМЗ титана значительно превышает прочность сплава Ti-6Al-4V ELI, в то же время пластичность материала при комнатной температуре ниже его КЗ аналога и титанового сплава Ti-6Al-4V ELI.

Результаты усталостных испытаний

Результаты испытаний гладких образцов из УМЗ CP Ti Grade 4 представлены (рис. 3, а) в сравнении с известными данными обычного КЗ Ti Grade 4 и сплава Ti-6Al-4V ELI. При анализе долговечности УМЗ образцов на разных уровнях напряжений установлено, что они не разрушаются после 10^6 циклов при максимальном напряжении 620 МПа. Из рис. 3, а видно, что усталостная прочность УМЗ образцов Ti Grade 4 превышает обычное крупнозернистое отожженное состояние почти в 1,5 раза и находится на уровне легированного

Таблица 1

Механические свойства сплава 6061 (средние значения)

Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2\%}$, МПа	δ , %
6061-Т6	385	330	16
6061-Н	680	640	5-7

Таблица 2

Механические свойства CP Ti Grade 4 и Ti-6Al-4V ELI

Условия обработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2\%}$, МПа	Удлинение, %
Состояние поставки	700	530	25
РКУП+ ТМО + отжиг	1235 ± 10	1085 ± 20	12,5 ± 1
Ti-6Al-4V ELI (традиционная обработка)	965	875	15

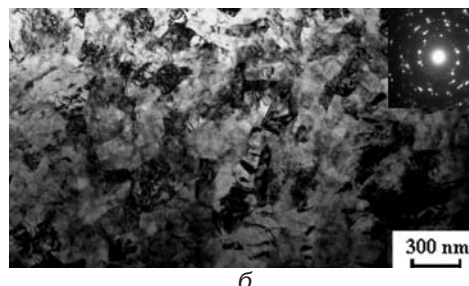
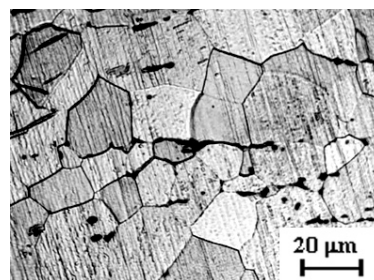


Рис. 1. Микроструктура CP Ti Grade 4 [11]: в состоянии поставки, поперечное сечение, ОМ (а); после РКУП и термомеханической обработки, поперечное сечение, ПЭМ (б)

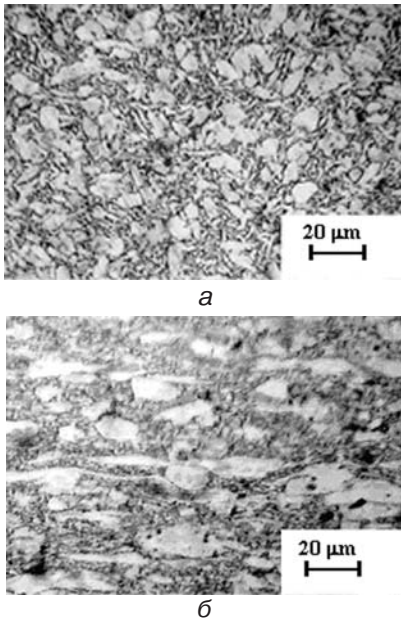


Рис. 2. Микроструктура Ti-6Al-4V ELI после традиционной обработки [11]: поперечное сечение (а); продольное сечение, ОМ (б)

сплава Ti-6Al-4V ELI с бимодальной структурой, имеющего наилучшие усталостные свойства.

При анализе долговечности УМЗ Ti Grade 4 на образцах с надрезом установлено, что образцы не разрушаются после 10^6 циклов при максимальном напряжении 395 МПа и ниже (рис. 3, б). С одной стороны, данный результат превышает известные из литературы данные для этого сплава в обычном

отожженном состоянии, у которых предел выносливости с $K_T = 2,7$ на базе 10^6 циклов составляет только 262 МПа. Вместе с тем, надрез значительно снижает сопротивление усталости материала, при этом пониженная пластичность УМЗ титана определяет его чувствительность к концентраторам напряжений. Следует отметить более высокий предел выносливости (470 МПа) в образцах с надрезом из медицинского сплава Ti-6Al-4V ELI по сравнению с УМЗ Ti, что, очевидно, обусловлено его более высокой пластичностью, которая обеспечила более низкую чувствительность к концентратору напряжений.

Поверхность разрушения образцов после усталостных испытаний

Данные фрактографического анализа образца из УМЗ Ti Grade 4 в многоцикловой области показали не совсем обычный характер усталостного разрушения: вытянутая форма зоны усталостной трещины, резкая граница между зоной развития усталостной трещины и зоной долома (рис. 4). Однако, поверхность излома образцов характеризуется бороздчатым рельефом как в зоне стабильного (II), так и в зоне ускоренного (III) развития усталостной трещины, что свидетельствует о достаточном запасе пластичности материала.

Фрактографический анализ поверхности разрушения образцов с надрезом из УМЗ Ti Grade 4 и Ti-6Al-4V ELI после испытаний в многоцикловой области показал значительное влияние структурного состояния на характер разрушения. Для фрактографического анализа были выбраны 2 образца с надрезом из УМЗ CP Grade 4 и КЗ Ti-6Al-4V, испытанных на одном уровне (403 и 409 МПа соответственно) и имеющих разную долговечность ($0,6 \cdot 10^5$ и 10^6 соответственно).

Общие черты разрушения данных образ-

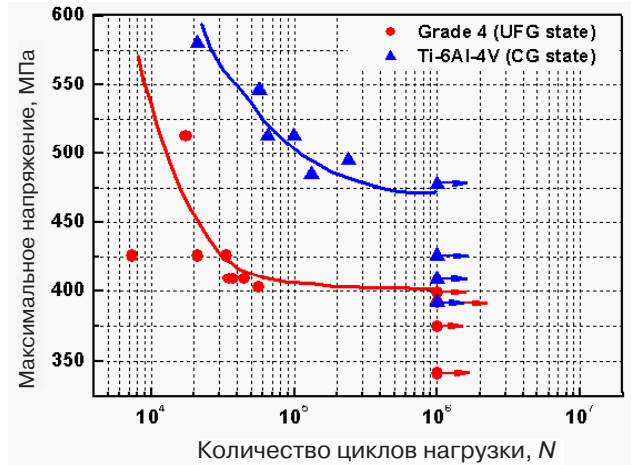
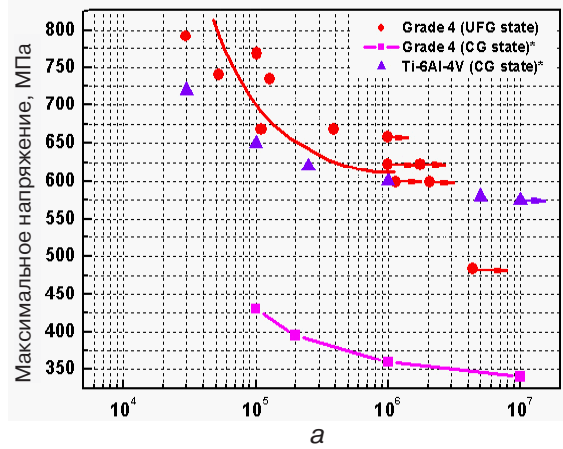


Рис. 3. Результаты усталостных испытаний образцов CP Ti Grade 4 в разных состояниях в сравнении со сплавом Ti-6Al-4V ELI [11]: образцы с гладкой рабочей поверхностью (а); образцы с надрезом, $K_T = 2,8$ (б)

цов характеризуются наличием нескольких очагов зарождения микротрещин из-за присутствия концентратора напряжений в виде надреза, их последующим объединением в одну магистральную трещину. Область развития усталостной трещины в обоих образцах занимает практически весь объем поверхности излома трещины, которая имеет 3 стадии развития: зоны стабильного (1), ускоренного развития трещины (2) и статического долома (3). Как известно, 1-я стадия роста усталостной трещины очень чувствительна к структурному состоянию материала. При анализе исследуемых образцов видно, что макрорельеф зоны стабильного роста трещины в КЗ сплаве характеризуется сдвиговым механизмом разрушения, что свой-

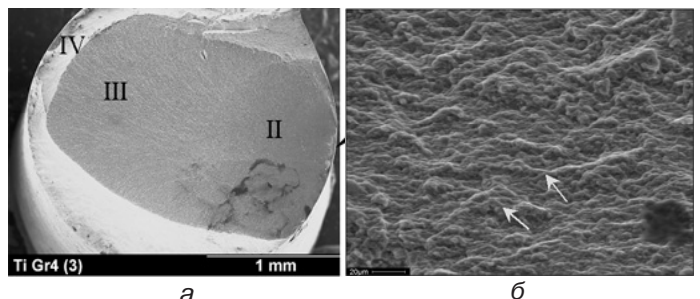


Рис. 4. Вид излома гладкого образца CP Ti Grade 4 после усталостных испытаний [11]: общий вид излома (а), зона стабильного развития трещины II (б)

ственно для данной стадии развития трещины обычных крупнозернистых материалов. В УМЗ титане стабильное развитие трещины происходило преимущественно по границам зерен. Подобный характер зарождения трещин в УМЗ титане после РКУП был обнаружен в работе [8]. При этом размер этой зоны в УМЗ и КЗ образце различен (примерно 150 и 300 мкм соответственно).

В зоне ускоренного развития трещины поверхностный рельеф изломов в обоих материалах характеризуется преимущественно ячеистым механизмом разрушения, где размер ячеек зависит от исходного размера зерна образца. В КЗ сплаве слияние «пор» происходило как внутри зерна, так и по межзеренным пространствам. В УМЗ образце наряду с равноосными ячейками, соизмеримыми с размером зерна, наблюдаются удлиненные перпендикулярно направлению развития трещины области рельефа, предположительно образовавшиеся по механизму квазивязкого «отрыва». При этом регулярность их расположения в рельефе трещины связана с циклическим приложением нагрузки. В целом можно заключить, что в УМЗ титане развитие трещины по преимущественно «ямочному» механизму свидетельствует о его достаточном запасе пластичности. Однако переход к ускоренному развитию трещины в УМЗ образце произошел раньше по сравнению с КЗ образцом ввиду их разной протяженности в рельефе изломов, что, очевидно, повлияло на его более низкую долговечность.

Достигнутое в результате комбинированной обработки повышение статической и усталостной прочности в УМЗ титане обусловлено, прежде всего, очень маленьким размером зерна, влияние которого на напряжение течения выражается соотношением Холла-Петча. Как показали усталостные испытания, проведенные в работе [11], как и многие другие УМЗ материалы, CP Ti Grade 4 демонстрируют повышенные значения предела выносливости по сравнению с крупнозернистым состоянием. При этом очевидно, что УМЗ структура будет обладать более высокой долговечностью, чем крупнозернистые материалы, обеспечивая более высокое сопротивление зарождению трещин. С другой стороны, границы зерен, особенно неравновесные, могут играть существенную роль в усталостном поведении УМЗ материалов, а именно, стать причиной концентрации напряжений, ранней локализации деформации и разрушения. Пониженная пластичность объемных УМЗ материалов, обусловленная их физической природой из-за затрудненного движения дислокаций, приводит к повышенной чувствительности к концентраторам напряжений, и, как следствие, ускоренному развитию усталостной трещины, о чем свидетельствуют фрактографические изображения изломов УМЗ и КЗ образцов. Как показали данные работы [11], предел выносливости гладких образцов УМЗ CP Grade 4 достигает уровня обычного крупнозернистого двухфазного сплава Ti-6Al-4V ELI и обусловлен, в первую очередь, их

более высокой статической прочностью, что значительно повышает сопротивление зарождению трещины. В то же время УМЗ образцы CP Grade 4 с надрезом уступают сплаву Ti-6Al-4V ELI, когда высокая чувствительность к концентратору напряжения в УМЗ состоянии возрастает из-за его недостаточной пластичности.

Таким образом, формирование в титане УМЗ структуры позволяет значительно повысить сопротивление зарождению трещин, что обеспечивает высокий уровень усталостной прочности, близкий к титановому сплаву системы Ti-6Al-4V. Вместе с тем, очевидно, что УМЗ титан имеет повышенную чувствительность к концентратору напряжений в виде надреза на рабочей части образца по сравнению со сплавом Ti-6Al-4V ELI, которая определяется пластичностью материала. Для обеспечения желаемого сочетания прочности и пластичности УМЗ материалов возможны разные подходы и наиболее перспективны, например, стабилизирующий отжиг [8-10], управление температурно-скоростными условиями деформации в процессе термомеханической обработки РКУП-заготовок.

Алюминий. Микроструктура и свойства образцов перед усталостными испытаниями представлены соответственно на рис. 5 и в табл. 1.

Как следует из полученных данных (табл. 3), для алюминиевого сплава 6061 с УМЗ структурой (6061-H) наблюдается интенсивное снижение значений ограниченного предела выносливости до значения $(\sigma_{H, \max}) \approx 285$ МПа (что соответствует приблизительно числу циклов до разрушения образцов $N_p \approx 3,50 \cdot 10^4$ цик). При дальнейшем снижении уровня циклического испытательного напряжения наблюдается существенное возрастание числа циклов до разрушения. Полученные данные позволяют предположить, что за величину ограниченного предела выносливости на базе $N_6 = 10^6$ циклов может быть принято значение $(\sigma_{H, \max N}) \approx 265$ МПа. Испытание на одноосное статическое растяжение показало, что для данной формы рабочей части образца его разрушение происходит на восходящей части кривой деформирования и $(\sigma_{H, \max}^*) = 525$ МПа.

Для сплава 6061, обработанного по режиму T6 (6061-T6), снижение ограниченного предела выносливости в подобном интервале изменения числа циклов до разрушения N_p происходит значительно менее интенсивно. Перелом на кривой выносливости наблюдается при $(\sigma_{H, \max}) \approx 250$ МПа. За величину ограниченного предела выносливости на базе $N_6 = 10^6$ циклов можно принять значение $(\sigma_{H, \max N}) \approx 230$ МПа. Максимальное номинальное напряжение, определенное по максимальной нагрузке на диаграмме растяжения образца равно $(\sigma_{H, \max}^*) = 374$ МПа.

Для проведения приближенной сравнительной оценки сопротивления усталости сплава 6061 в двух рассмотренных состояниях воспользуемся двумя параметрами: значением предела выносливости на базе $N_6 = 10^6$ циклов и относительной величиной $n_\sigma [n_\sigma = (\sigma_{H, \max N}^*) / (\sigma_{H, \max}^*)]$, показывающей степень снижения ограниченного предела вы-

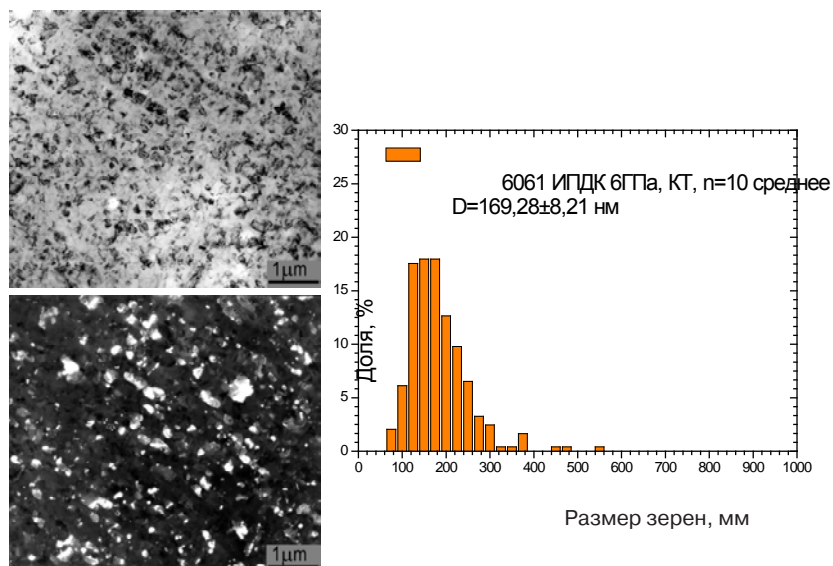


Рис. 5. Микроструктура образцов и размер зерна после ИПДК [12]

Результаты усталостных испытаний

Таблица 3

6061-Н						
$(\sigma_{n, \max})_{\text{МПа}}$	525	365	320	285	275	265
$N_{р, \text{цикл}}$	0	$1,40 \cdot 10^4$	$2,40 \cdot 10^4$	$3,50 \cdot 10^4$	$1,80 \cdot 10^5$	$>10^6$
6061-Т6						
$(\sigma_{n, \max})_{\text{МПа}}$	374	310	285	275	250	230
$N_{р, \text{цикл}}$	0	$1,70 \cdot 10^4$	$3,50 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^4$	$1,30 \cdot 10^5$	$>10^6$

носливости по отношению к номинальному максимальному напряжению (являющемуся аналогом временного сопротивления) и характеризующей чувствительность материала к воздействию

стадиях стабильного и ускоренного РУТ. Разрушение с образованием вязких усталостных бороздок обеспечивает замедление РУТ на стадии ее стабильного роста и плавный переход к стадии

циклической нагрузки. Для сплава 6061-Н это отношение $n_{\sigma} = 0,504$, а для сплава 6061-Т6 – $n_{\sigma} = 0,614$.

Из сравнения полученных величин следует, что значение ограниченного предела выносливости сплава 6061-Н в $\approx 1,15$ раза превышает значение $(\sigma_{\max})_N$ сплава 6061-Т6. Для величин n_{σ} наблюдается обратное соотношение: у сплава 6061-Т6 значение n_{σ} в $\approx 1,22$ раза больше, чем у сплава 6061-Н.

Такое соотношение указанных параметров обычно характерно для материалов в отожженном и упрочненном (с пониженной пластичностью) состояниях. Можно предположить, что степень чувствительности сплава 6061 в нанокристаллическом состоянии к воздействию циклической нагрузки усиливается за счет влияния концентрации напряжений, возникающих в зоне разрушения образца.

Проведенный фрактографический анализ показал ряд отличительных признаков в микрорельефе поверхности усталостного разрушения сплавов 6061-Н и 6061-Т6. Из полученных фрактограмм (рис. 6) видно, что у образцов сплава 6061-Н отсутствует характерный признак роста усталостной трещины (РУТ) бороздчатый рельеф на

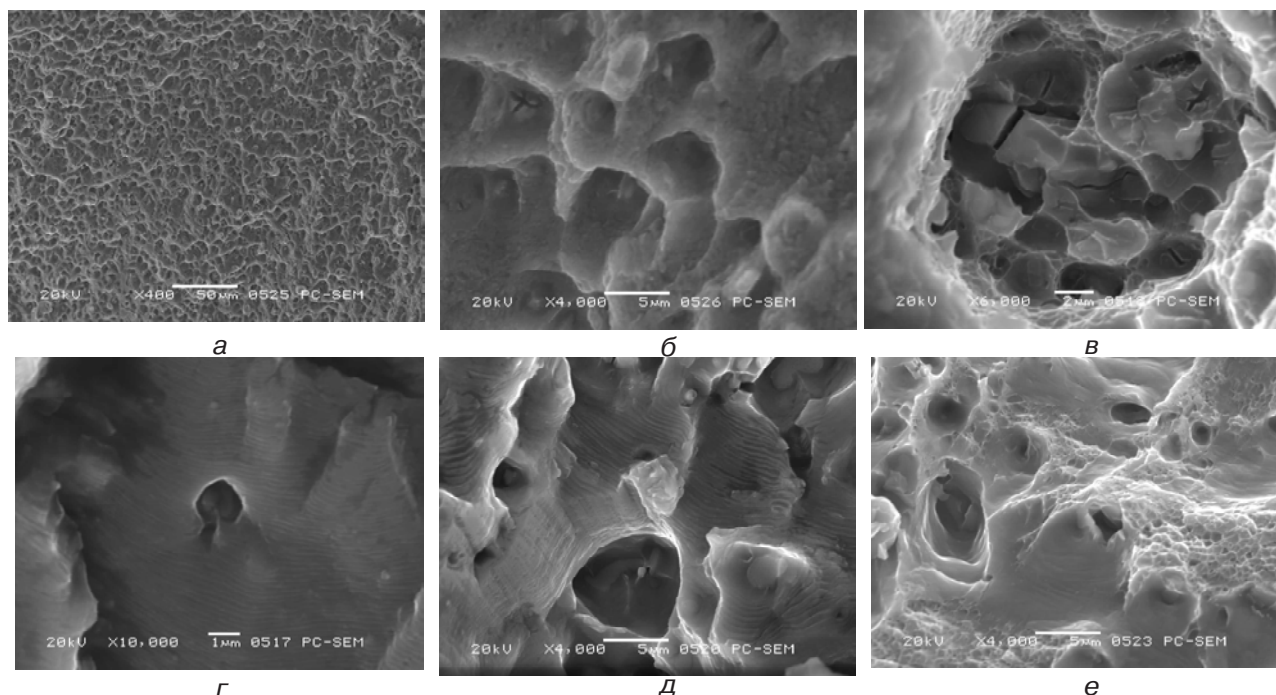


Рис. 6. Ямочный рельеф образца сплава 6061-Н в зоне стабильного РУТ (а), ускоренного РУТ (б); области (кластеры) хрупкого разрушения в зоне долома образца сплава 6061-Н (в); бороздчатый рельеф в зоне стабильного РУТ образца сплава 6061-Т6 (г); ямочно-бороздчатый рельеф в зоне ускоренного РУТ образца сплава 6061-Т6 (д); ямочный рельеф (область вязкого разрушения) в зоне долома образца сплава 6061-Т6 (е)

ускоренного роста и зоне долома. В зоне долома образцов сплава 6061-Н отчетливо выявляются области (кластеры) хрупкого разрушения. По всей видимости наличие таких областей обуславливает снижение пластичности сплава 6061-Н.

В заключении необходимо отметить, что повышение разрушающего напряжения сплава 6061 за счет создания УМЗ структуры в целом оказывает

положительное влияние на работоспособность сплава: повышается значение ограниченного предела выносливости; значительно расширяется диапазон рабочих циклических напряжений (особенно в области малоциклового усталости), в котором может использоваться данный алюминиевый сплав.



ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
2. Mukherjee Advanced mechanical properties of pure titanium with ultrafine grained structure //A. Sergueeva, V. Stolyarov, R. Valiev, A. Scripta Mater. 45. – 2001. – P. 747-752.
3. Grain refinement and properties of pure Ti processed by warm ECAP and cold rolling // V. Stolyarov, Y. Zhu, I. Alexandrov, T. Lowe, R. Valiev Mater. Sci. Eng. – A 343. – 2003. – P. 43-50.
4. Садикова Г. Х., Латыш В. В., Семенова И. П., Валиев Р. З. Влияние интенсивной пластической деформации и термомеханической обработки на структуру и свойства титана // МиТОМ. – № 11. – 2005. – С. 31-34.
5. Brunette D. M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P. Titanium in medicine // Springer. – 2001. – P. 1019.
6. Hoppel H. W., Valiev R. Z. On the Possibilities to Enhance the Fatigue Properties of Ultrafine-Grained Materials // Zeitschrift fuer Metallkunde. – Vol. 93. – 2002. – № 7. – P. 641-648,
7. Виноградов А. Ю., Хасимото С. Усталость ультрамелкозернистых материалов, полученных рваноканальным угловым прессованием // Металлы. – 2004. – № 1. – С. 51-62.
8. Vinogradov A., Stolyarov V., Hashimoto S., Valiev R. Cyclic Behavior of Ultrafine-Grained Titanium Produced by Severe Plastic Deformation. // Mater. Sci. Eng. – A318. – 2001. – P. 163-173.
9. Hoppel W., Zhou Z. M., Mughrabi H., Valiev R. Z., Microstructural Study of the Parameters Governing Coarsening and Cyclic Softening in Fatigued Ultrafine-Grained Copper // Phil. Mag. A. – Vol. 82. 2002. – № 9. – P. 1781-1794.
10. Mughrabi H., Hoppel H. W., Kautz M., Valiev R. Z. Annealing treatments to enhance thermal and mechanical stability of ultrafine-grained metals produced by severe plastic deformation. // Zeitschrift for Metallkunde. – Vol, 94, № 10. – 2003. – P. 1079-1083.
11. Исследование усталостных свойств титановых полуфабрикатов с ультрамелкозернистой структурой. / И. П. Семенова, Г. Х. Салимгареева, В. В. Латыши др. МиТОМ. – 2009. – № 2. – С.
12. Мурашкин М. Ю., Кунавин С. А., Валиев Р. З. Усталостные свойства алюминиевых сплавов в наноструктурном состоянии // Физическое материаловедение: Наноматериалы технического и медицинского назначения. – Тольятти, 2007.

КУНАВІН С. А. Механічні властивості при циклічному навантаженні ультрадрібнозернистих матеріалів на основі Al і Ti

Наведено узагальнені результати досліджень стандартних механічних властивостей і втомної міцності матеріалів на основі Ti і Al з ультрадрібнозернистою структурою, що отримана методами інтенсивної пластичної деформації. Спостерігається суттєве зростання міцнісних характеристик (на $\approx 80\%$) та границі обмеженої витривалості.

Ключові слова: інтенсивна пластична деформація, рівноканальне кутове пресування, механічні властивості, межа витривалості, механізми руйнування

KUNAVIN S. Mechanical properties of ultrafine grained materials based on Al and Ti under cyclic loading

The generalized results of researches of standard mechanical properties and tireless durability of materials on the basis of Ti and Al with the ultrafine-grained structure received the methods of intensive plastic deformation are resulted. There is substantial growth of durability descriptions (on $\approx 80\%$) and limit of the limited endurance.

Keywords: severe plastic deformation, equal-channel angular pressing, mechanical properties, fatigue limits, fracture mechanisms