

І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 539.385

Д-р техн. наук В. Ф. Терентьев

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова, г. Москва

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗМЕРА ЗЕРНА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ (ОБЗОР)

В работе рассмотрено влияние предварительной пластической деформации (в том числе и интенсивной пластической деформации) и размера зерна на характеристики усталостной прочности при комнатной температуре титана и его сплавов

Ключевые слова: титан и его сплавы, размер зерна, интенсивная пластическая деформация, усталостная прочность.

Введение

Ранее был проведен ряд исследований по влиянию предварительной пластической деформации и размера зерна на циклическую прочность металлических материалов и, в частности, титана и его сплавов [1–4]. Чаще всего предварительная пластическая деформация и уменьшение размера зерна приводят к повышению характеристик циклической прочности металлических материалов при комнатной температуре. Хотя есть достаточно противоречивые данные по поводу влияния предварительной пластической на усталостную прочность металлических материалов [1, 5]. В работе [5] приводятся данные о снижении усталостной прочности некоторых алюминиевых сплавов после предварительной деформации растяжением, а прокатка не улучшает ее. В монографии [6] показано, что малые предварительные пластические деформации часто снижают усталостную прочность металлических материалов. Также нужно учесть, что существует ряд других факторов (вид усталостного нагружения, способность к деформационному старению, особенности деформированной структуры и др.), которые также влияют на поведения металлов и сплавов при циклическом деформировании.

В настоящее время имеются технологии интенсивной пластической деформации (ИПД) (равноканальное угловое прессование – РКУП, кручение под гидростатическим давлением – КГД, экструзия и др.), с помощью которых можно получить массивные металлические субмикроструктурные (СМК) материалы с размером зерна 100–500 нм и высокими статическими прочностными характеристиками [7]. Пове-

дение СМК титана и его сплавов в условиях циклического деформирования вызывает большой интерес [8–18], поскольку часто нет однозначной зависимости между высокими механическими свойствами при статическом деформировании этих материалов и характеристиками усталости. Это связано с длительностью испытаний при усталости и в связи с этим возможностью протекания процессов возврата в сильно деформированной металлической структуре. Поэтому исследование влияние интенсивной пластической деформации на характеристики усталости титана и его сплавов представляют большой интерес. Но сначала есть смысл кратко остановиться на ранних исследованиях по влиянию предварительной пластической деформации и размера зерна на характеристики усталости титана.

Влияние предварительной пластической деформации и размера зерна на циклическую прочность титана

В работе [19] исследовали малоцикловую усталость отожженного (750 °С в вакууме – 1 ч) чистого титана с размером зерна от 200 до 400 мкм. Испытания на усталость проводили в условиях общей деформации за цикл нагружения трех серий образцов: отожженных образцов, образцов после предварительной статической деформации на 20 % и образцов предварительно тренированных при циклическом деформировании в течение 10 циклов при амплитуде деформации $\pm 1,5$ до того же самого напряжения, при котором была получена предварительная деформация 20 %. Из представленных на рис. 1 экспериментальных данных видно, что долговечность предварительно деформирован-

ных образцов на базе $5 \cdot 10^4$ циклов нагружения меньше долговечности отожженного материала. Авторы [19] связывают уменьшение долговечности титана после предварительной деформации с взаимодействием механических двойников с дислокациями или границами зерен, в результате которого возникают локальные области высокой концентрации напряжений и которые являются местами предпочтительного зарождения и распространения трещин. Аналогичные данные по малоциклового усталости были получены на техническом титане [3].

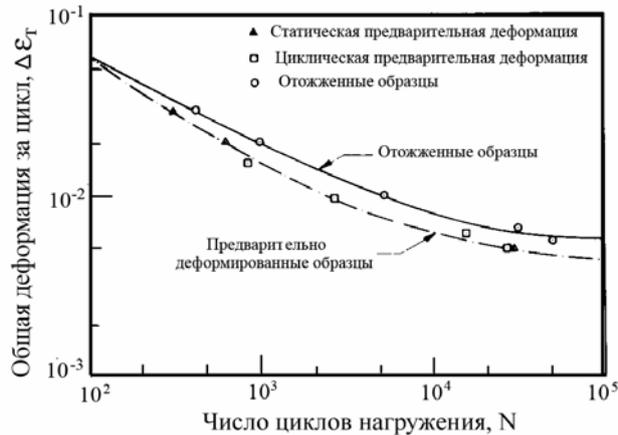


Рис. 1. Кривые малоциклового усталости технически чистого титана [19]

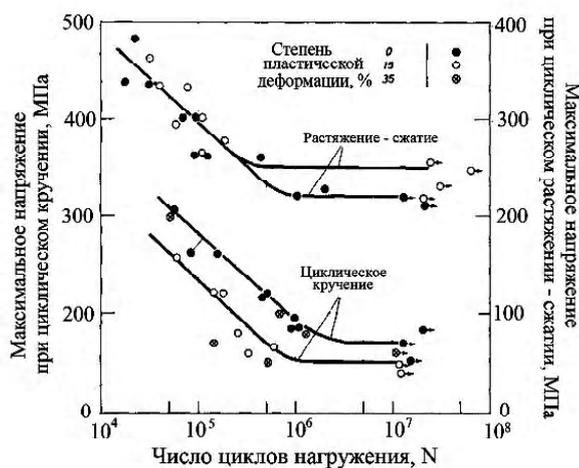
Влияние предварительной деформации на многоцикловую усталость титана исследовалось в ряде работ [1, 2]. В работе [2] на образцах из отожженного технического титана Ti 160 (содержание кислорода 0,27 вес. %, отжиг в вакууме при $850\text{ }^\circ\text{C}$ – 24 ч, размер зерна 0,15 мм) исследовали влияние предварительной статической деформации при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ (деформация 2 %) и температуре $196\text{ }^\circ\text{C}$ (деформация 10 %) и последующего отжига при температурах $190\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ на предел усталости в условиях симметричного растяжения-сжатия. Было показано, что предел выносливости снижался с 270 МПа до 200 МПа, если предварительная деформация осуществлялась при комнатной температуре, и до 155 МПа, если предварительно деформировали материал при температуре $196\text{ }^\circ\text{C}$. Снижение предела выносливости после предварительной деформации авторы [2] связывают с разблокировкой дислокаций (предварительная деформация при комнатной температуре) и механическим двойникованием и межзеренным растрескиванием (предварительная деформация при низкой температуре). Последующий отжиг при температуре выше $400\text{ }^\circ\text{C}$ восстанавливал уровень предела выносливости для образцов, предварительно деформированных при комнатной температуре, но не восстанавливал усталостные свойства образцов после предварительной деформации при $196\text{ }^\circ\text{C}$, поскольку процессы возврата и рекристаллизации в этом случае не могут устранить повреждаемость, внесенную предварительной деформацией.

В работах [20, 21] наблюдали некоторое повышение усталостной прочности титана после предварительной пластической деформации и последующего искусственного старения. Так, в работе [20] было показано, что предварительное динамическое деформационное старение в условиях растяжения, чистого сдвига и сжатия при температурах 20 и $100\text{ }^\circ\text{C}$ существенно повышает ограниченную долговечность отожженного ($700\text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме – 2,5 ч) технически чистого титана VT1-0 в условиях плоского изгиба. Предел выносливости увеличивается на 11 % в случае предварительной деформации растяжением при $100\text{ }^\circ\text{C}$ и на 17 и 23 % при предварительной деформации на сдвиг и сжатие соответственно. Пределы выносливости исследованного титана находились в интервале значений от 175 МПа до 216 МПа.

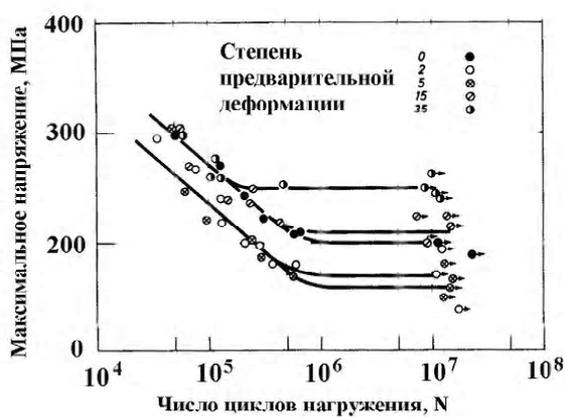
В работе [22] исследовали влияние предварительного деформирования и размера зерна (величиной от 12 000 до 80 зерен на мм^2) на циклическую прочность технически чистого отожженного α -титана Ti 120 (0,087O₂; 0,01N₂; 0,024C; 0,02 %Fe) при температурах 20 , 60 и $196\text{ }^\circ\text{C}$. Показано, что уменьшение размера зерна у отожженного и предварительно деформированного титана приводит к повышению предела выносливости при всех исследованных температурах. При одном и том же размере зерна максимальная циклическая прочность наблюдается при температуре $196\text{ }^\circ\text{C}$ (до 475 МПа). Однако, кроме размера зерна, на циклическую прочность титана очень сильное внимание оказывают примеси внедрения (кислород, азот и углерод). При одном и том же размере зерна наличие примесей сильно изменяет циклическую прочность титана. Высказано предположение, что изменение предела выносливости в зависимости от количества внедренных примесей связано с изменением напряжения трения кристаллической решетки [22].

В работе [1] исследовали влияние предварительной пластической деформации на усталостную прочность нелегированного титана (0,04C; 0,02Fe; 0,009N; 0,045N, вес. %) после отжига в вакууме при $650\text{ }^\circ\text{C}$ – 1/2 ч. Образцы для испытаний на циклическое растяжение-сжатие были сделаны из прутков, имеющих следующие механические свойства: $\sigma_s = 520$ МПа, $\sigma_{0,2} = 390$ МПа, $\delta = 28\%$, а образцы циклического кручения имели следующие механические свойства: $\sigma_s = 472$ МПа, $\sigma_{0,2} = 286$ МПа, $\delta = 28,5\%$. На рис. 2, а представлены результаты испытаний на симметричное осевое растяжение-сжатие и циклическое кручение образцов титана с цилиндрической рабочей частью из после различных степеней предварительной пластической деформации.

Видно, что при испытании в условиях растяжения-сжатия в области малоциклового усталости предварительная деформация практически не влияет на долговечность материала, однако несколько повышает уровень предела выносливости (на 13 %). В случае циклического кручения и долговечность и уровень предела



а



б

Рис. 2. Влияние предварительной деформации растяжением на циклическую прочность титана в условиях симметричного растяжения – сжатия и кручения (а) и в условиях симметричного плоского изгиба (б) [1]

выносливости снижаются после предварительной пластической деформации. На рис. 2, б представлены данные по влиянию предварительной деформации прокаткой (от 2 до 35 %) на циклическую прочность титана в условиях знакопеременного изгиба плоских образцов. В то время как после предварительной деформации на 2 и 5 % происходит уменьшение долговечности и снижение предела выносливости на ~ 20 % по сравнению с недеформированным материалом, то при больших степенях предварительной деформации предел выносливости возрастает на 25 %.

В работе [1] были обобщены многочисленные экспериментальные данные по зависимости усталостной прочности титана в условиях знакопеременного изгиба от уровня предела прочности (рис. 3).

Видно, что отношение предела выносливости к пределу прочности σ_R/σ_B меняется в значениях от 0,5 до 0,8 и предварительная деформация во многих случаях снижает предел выносливости в условиях циклического изгиба. Авторы [1] снижение циклической прочности при определенных условиях предварительной пластической деформации и условий циклических испытаний связывают с более ранним зарождением усталостных трещин на границах двойников и в полосах скольжения.

В работе [23] на компактных образцах ($140 \times 35 \times 5$ мм) из технического титана Ti 115, Ti 130 и Ti 155 фирмы IMI исследовали влияние размера зерна, концентрации примесей внедрения и асимметрию цикла

Таблица 1 – Влияние примесей внедрения, режимов отжига и размера зерна на механические свойства технического титана [23]

Марка	O	N	C	Режим отжига	Средний размер зерна, мм	$\sigma_{0,2}$, МН/м ²	σ_B , МН/м ²
Ti 115	0,095	0,0080	0,010	3 ч, 973 К	0,035	260	360
				24 ч, 1123 К	0,23	220	390
Ti 130	0,160	0,0085	0,030	3 ч, 1123 К	0,040	430	520
				3 ч, 923 К	0,020	630	720
Ti 155	0,340	0,0075	0,020	24 ч, 1273 К	0,21	580	590

нагружения на закономерности распространения усталостных трещин. Основные характеристики исследованных марок титана представлены в таблице 1, а на рис. 4 представлены кинетические кривые усталостного разрушения.

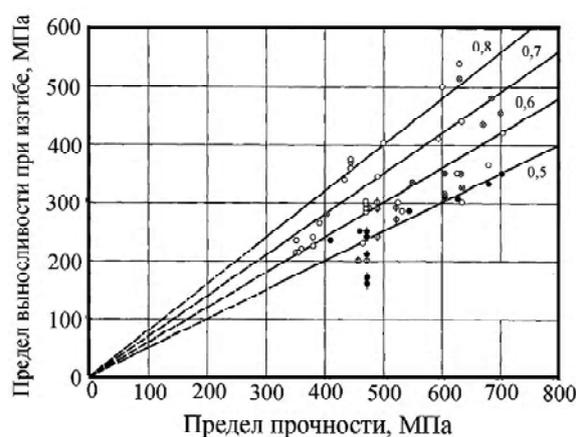


Рис. 3. Зависимость предела выносливости при знакопеременном изгибе чистого титана при комнатной температуре от предела прочности [1]:

○ – отожженные образцы; ● – холоднотемпературнодеформированные образцы; ⊙ – обработка неизвестна; цифрами на графике указаны значения отношения предела выносливости к пределу прочности, которые ограничивает соответствующая прямая линия

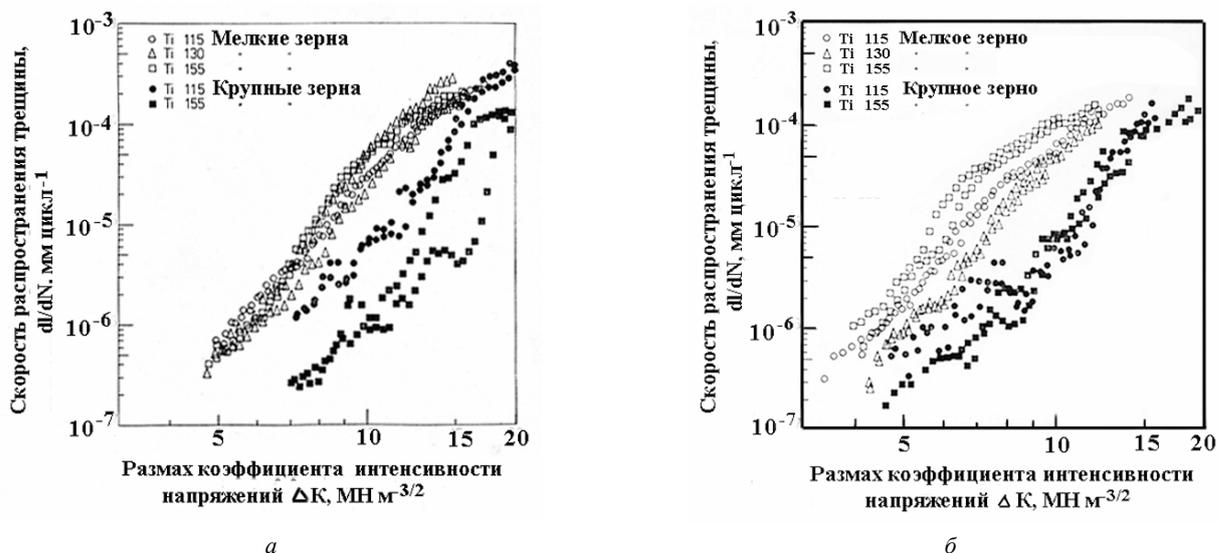


Рис. 4. Влияние размера зерна, содержания примесей внедрения и асимметрии цикла нагружения на циклическую трещиностойкость технического титана (*a* – асимметрия цикла $R = 0,07$; *b* – $R = 0,35$) [23]

Было показано [23], что изменение концентрации примесей сильно влияет на $\sigma_{0,2}$ и σ_B и мало влияет на скорость распространения усталостной трещины dl/dN при мелком зерне. Наоборот, увеличение размера зерна сильно уменьшает dl/dN и особенно при малых амплитудах коэффициента интенсивности напряжений ΔK с увеличением концентрации примесей внедрения. Усталостные трещины распространяются внутризеренно и путь распространения трещин при низких ΔK контролируется ориентировкой зерен. Многие зерна при этом разрушаются по серии параллельных плоскостей, в результате чего образуются фасетки, напоминающие фасетки скола. При высоких значениях ΔK зеренная морфология усталостного излома менее выражена. Здесь появляются усталостные бороздки, слегка изменяющие направление при переходе от зерна к зерну. Основной вывод работы [23]: при низких значениях ΔK рост усталостных трещин в техническом титане замедляется при уменьшении коэффициента асимметрии цикла, увеличении размера зерна и концентрации примесей внедрения.

Влияние субмикроструктурной (СМК) структуры, полученной после интенсивной пластической деформации на циклическую прочность титана и его сплавов

В ряде работ [8–18] было показано, что интенсивная пластическая деформация приводит к существенному повышению прочностных свойств титана и его сплавов в условиях статического и циклического деформирования. Интересные экспериментальные данные с использованием РКУП были получены при исследовании влияния СМК состояния титана ВТ1-0 (0,12 %O; 0,18 %Fe; 0,07 %C; 0,04 %N; 0,01 %H) на статическое растяжение и циклическую прочность в условиях симметричного изгиба с вращением с пост-

роением кривых усталости ускоренным методом при ступенчатом нагружении по методу Локатти [8, 24]. Предел прочности в исходном горячекатаном состоянии у титана ВТ1-0 составлял 460 МПа, а в наноструктурном фрагментированном состоянии – 1100 МПа. На рис. 5, *a* представлены кривые усталости. СМК-структуры в титане были получены сочетанием теплового РКУП и последующей термомеханической обработки. В СМК состоянии 1 наблюдалась равноосная зеренная структура со средним размером зерна 0,25 мкм и повышенной плотностью решеточных дислокаций (до 10^{12} – 10^{13} м⁻²). Состояние 2 характеризуется волокнистой в осевом направлении структурой с размером зерна 0,15 мкм и более высокой плотностью дислокаций 10^{14} – 10^{15} м⁻².

В структурном состоянии 3 размер зерна составлял 0,15 мкм. Для этого состояния характерны наличие высоко- и малоугловых границ зерен с плотностью дислокаций 10^{13} – 10^{14} м⁻², а также появление зерен, полностью свободных от дислокаций. Из рис. 5, *a* видно, что максимальной циклической прочностью обладает фрагментированная наноструктура 3, у которой наблюдается также наибольший предел прочности. Предел выносливости этой структуры возрастает в 2 раза (482 МПа) по сравнению с горячекатаным состоянием (238 МПа), однако пластичность состояния 3 наименьшая (9%). Общая тенденция связана с тем, что чем выше предел прочности, тем больше возрастает уровень предела выносливости гладких образцов.

В работах [9, 10] исследовали усталостную прочность (знакопостоянный циклический изгиб плоских образцов) титана технической чистоты ВТ1-0 и сплава ВТ6 в состояниях заводской поставки и после РКУП. В состоянии поставки структура титана ВТ1-0 характеризуется равноосными зернами размером 5–7 мкм

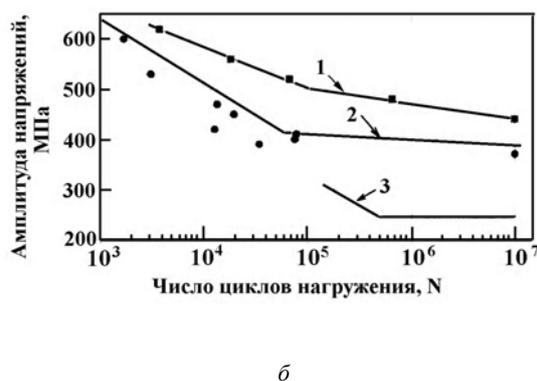
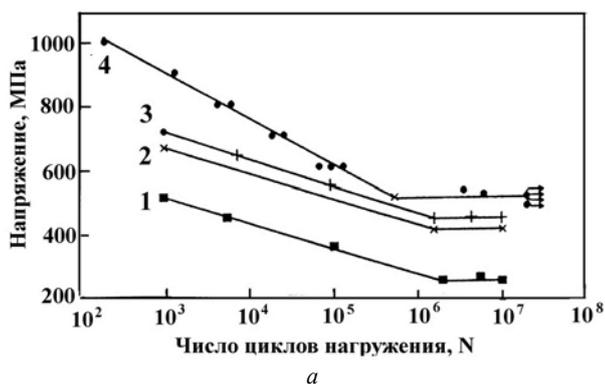


Рис. 5. Кривые усталости для исходного (1) и наноструктурного титана с равноосной (2), волокнистой (3) и фрагментированной (4) структурой [8, 24] (а) и кривые усталости титана с различным размером зерна [25] (б):

1 – кривая усталости после РКУП и холодной прокатки;
2 – после РКУП; 3 – размер зерна 9 мкм [22]

с плотностью дислокаций 10^9см^{-2} . После РКУП размер элементов зеренно – субзеренной структуры составлял (0,35–0,15) мкм, плотность дислокаций – $2 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2}$. В сплаве ВТ6 в состоянии поставки наблюдалась равноосная структура со средним размером зерен около 2 мкм. После РКУП в сплаве ВТ6 в вытянутых в направлении вдоль оси прессования 80 % зерен α - фазы образуется мартенсит. Поперечный размер этих зерен составлял $\approx 2,5$ – $1,5$ мкм, а продольный 10 мкм и более. Поперечный размер пластин мартенсита изменялся от 10 до 100 нм. В сплаве ВТ6 развитие деформационных процессов при циклическом нагружении сопровождается образованием мартенситной фазы, структура и закономерности формирования которой во многом определяют усталостные свойства материала. Предел прочности технического титана после РКУП достигает значения 1140 МПа, а предела текучести – до 960 МПа. Предел выносливости титана ВТ1-0 на базе 10^6 в состоянии поставки составлял 350 МПа, а после ВТ1-0 – 520 МПа. В сплаве ВТ6 соответственно 570 и 670 МПа [27, 28]. В работе [24] также показано, что в ультрамелкозернистом чистом титане после РКУП предел усталости возрастает в 1,67 раза, однако чувствительность к надрезу повышается.

Влияние СМК структуры на циклическую прочность технически чистого титана ВТ1-0 (0,12O; 0,18Fe; 0,04C; 0,04N; 0,01H; ост. Ti; вес. %) было изучено в работах [25, 26]. Такая структура с размером зерна 300 нм ($\sigma_s = 810$ МПа; $\sigma_m = 650$ МПа; $\delta = 15$ %) была получена после РКУП (многократное прессование осуществлялось по маршруту B_c при температурах 400–450 °С). Часть образцов после РКУП подвергалась холодной прокатке со степенью обжатия 75 % и последующему стабилизирующему отжигу при 300 °С в течение 1–2 ч. Для сравнения исследовались образцы с размером зерна 25 мкм ($\sigma_s = 460$ МПа; $\sigma_m = 380$ МПа; $\delta = 26$ %). Испытания при симметричном растяжении-сжатии на многоцикловую усталость цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 7 мм проводи-

лись при частоте 10 Гц, а на малоцикловую усталость – 2 Гц. На рис. 5, б представлены кривые усталости образцов с СМК структурой и для сравнения приведена кривая усталости крупнозернистого титана (размер зерна 9 мкм), полученная ранее в работе [22]. Видно, что максимальный предел усталости наблюдается у образцов, подвергнутых РКУП и последующей холодной прокатке (кривая 1), а предел усталости крупнозернистого материала (кривая 3) значительно ниже образцов подвергнутых РКУП предел усталости после РКУП (кривые 1 и 2). Характеристики малоциклового усталости СМК (после РКУП) и крупнозернистого материала (размер зерна 25 мкм) практически одинаковы (рис. 6, а), что свидетельствует о хорошей способности к циклическому упрочнению материала после РКУП. Это подтверждают данные характеристик циклического деформирования (рис. 6, б).

В работе [27] исследовали циклическую трещиностойкость чистого титана с размером зерна 22 мкм (предел текучести 430 МПа) и СМК титана с размером зерна 250 нм (предел текучести 635 МПа). СМК титан получали методом РКУП (8 проходов при температуре 425 °С). Испытания на циклическую трещиностойкость проводили на компактных образцах толщиной 3 мм при асимметрии цикла нагружения $R = 0,1$ и $0,3$ с частотой 10 Гц. Показано, что скорость распространения усталостной трещины в СМК материале на порядок выше, чем в крупнозернистом материале. Пороговый коэффициент интенсивности напряжений ΔK_{th} также в СМК материале в 2,5 раза меньше, чем в крупнозернистом.

В работах [14] исследовали усталость титанового сплава системы Ti-6Al-4V (6,3Al; 4,1V; 0,18Fe; 0,182O; 0,003Si; ост. Ti; вес. %) в субмикроструктурном состоянии (глобулярные зерна α - и β - фаз размером $\sim 0,4$ мкм), которое получали путем многократной всесторонней осадки заготовок диаметром 25 мм при температурах 650–550 °С. После такой обработки заготовки отжигали при 650 °С. Для сравнения изучали

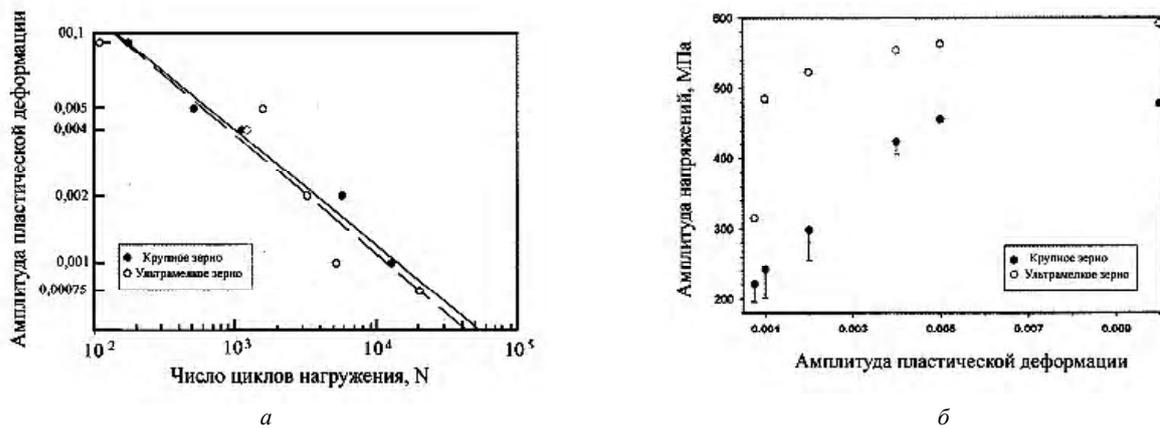


Рис. 6. Влияние размера зерна титана на кривые малоциклового усталости (а) и кривые циклического деформирования титана (б) [26]

характеристики усталости сплава с размером зерна 10 мкм. Предел текучести с уменьшением размера зерна возрастает с 960 МПа до 1180 МПа, а предел прочности с 1050 до 1300 МПа. Относительное сужение возрастает с уменьшением размера зерна с 32 до 60 %. Однако относительное удлинение уменьшается с 9 до 7 %. Предел усталости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов выше у субмикроструктурного материала и составляет 693 МПа по сравнению с 580 МПа у материала с размером зерна 10 мкм.

В работе [16] исследовали влияние интенсивной пластической деформации на мало- и многоцикловую усталость титанового сплава Ti-6Al-4V (Al – 6,2; V – 4,2; Fe – 0,25; C – 0,01; O – 0,11; N – 0,0045; H = 0,004; ост. Ti, вес. %). Исходные заготовки диаметром 40 мм были подвергнуты отжигу при 960 °С, закалены в воду и состарены в течение 4 часов при температуре 650 °С. Затем прутки были подвергнуты комбинированной обработке, включающей РКУП ($T = 650$ °С,

угол 90 °, маршрут Bc, 2 прохода). После этого прутки прошли 6-ступенчатую экструзию (5 проходов при 350 °С и последний проход при комнатной температуре). Предел прочности после такой комбинированной обработки увеличился с 930 МПа для исходного материала до 1360 МПа для СМК титана, а удлинение уменьшалось соответственно с 20 до 13 %. Результаты малоцикловых испытаний в условиях симметричного растяжения-сжатия (диаметр рабочей части образца 8 мм) с постоянной амплитудой пластической деформации за цикл в диапазоне $3 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ и с нагружения частотой 2 Гц представлены на рис. 7, а. На кривых циклического упрочнения/разупрочнения во всех случаях в начале деформирования наблюдается циклическое разупрочнение вне зависимости от размера зерна. При низкой амплитуде деформации наблюдается стадия насыщения, а у крупнозернистого материала непосредственно перед разрушением наблюдается деформационное упрочнение.

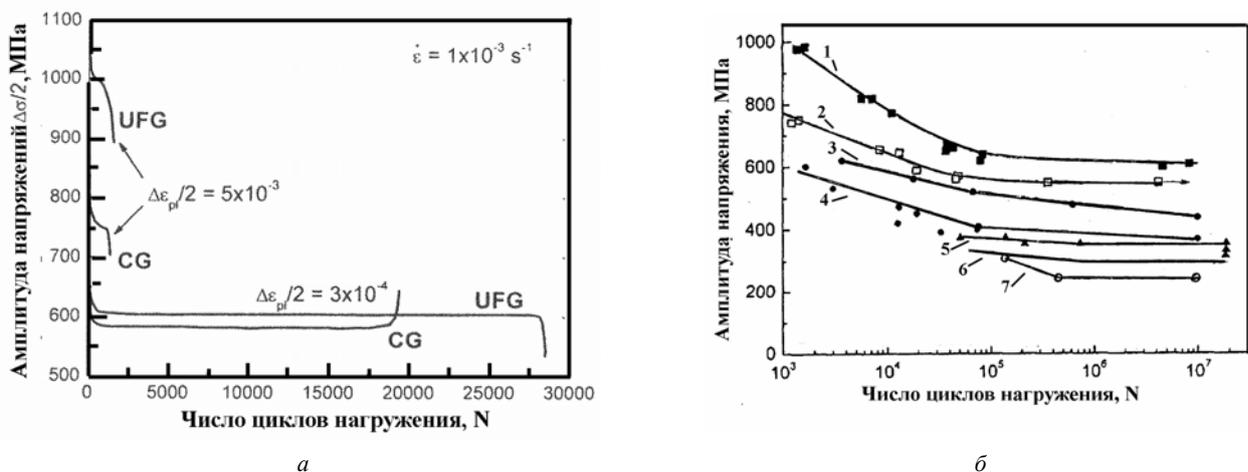


Рис. 7. Кривые циклического упрочнения / разупрочнения сплава Ti-6Al-4V (а) [16] и кривые усталости титана и его сплавов с различным размером зерна (б): 1,2 – СМК и крупнозернистый титановый сплав соответственно [16]; 3,4 – СМК – Ti [25, 26]; 5, 6 – СМК и крупнозернистый титановый сплав соответственно [14]; 7 – крупнозернистый титан [22]

Многоцикловую усталость изучали на цилиндрических образцах в условиях консольного изгиба с вращением с частотой 50 Гц. На рис. 13 приведены результаты усталостных испытаний авторов работы [16] (кривые 1 и 2) и данные других авторов [14, 22, 25, 26]. Из данных, представленных на рис. 7, б, видно, что после интенсивной пластической деформации титана и его сплавов предел выносливости находится в диапазоне напряжений 400–620 МПа, что значительно выше, чем известные данные по пределу выносливости у технически чистого титана.

В работах [16–18] исследовалась статическая и усталостная прочность двух серий образцов из технического чистого титана Grade 4 (США) следующего химического состава: С – 0,052; N – 0,015; O – 0,34; H – 0,015; Fe – 0,3; ост. Ti в вес. %. Серия 1: образцы изготавливались из исходных горячекатаных заготовок диаметром 25 мм с размером зерна $H \approx 25$ мкм. Серия 2: исходные заготовки были подвергнуты комбинированной обработке (ТМТ), включающей РКУП ($T = 450$ °С, угол 90 °, маршрут Bc, 4 прохода), последующую термомеханическую обработку волочением с суммарным обжатием 80 % в интервале температур 350...400 °С и с последующим отжигом при 300 °С в течение 1 часа. В результате такой обработки были получены прутки диаметром 7 мм и длиной 3 м с СМК равноосной зеренной структурой размером 150 нм. Механические испытания в условиях растяжения проводили на образцах с диаметром рабочей части 3 мм. В результате такой комбинированной обработки предел прочности

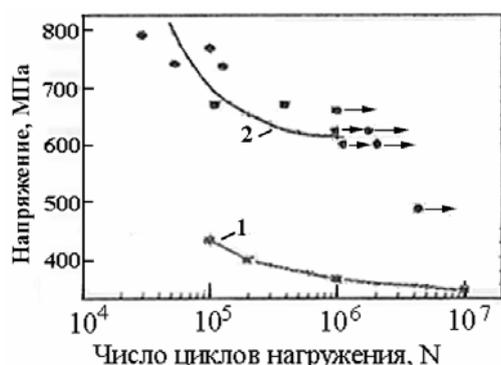
возрос с 700 до 1240 МПа, условный предел текучести – с 530 до 1200 МПа, а удлинение снизилось с 25 до 12 %. Испытания на усталость проводились в условиях повторного растяжения (коэффициент асимметрии цикла $R = 0, 1$) с частотой 20 Гц. Механические свойства Ti Grade 4 в различном структурном состоянии представлены в таблице 3.

В результате такой комбинированной обработки предел прочности возрос с 700 до 1240 МПа, условный предел текучести – с 530 до 1200 МПа, а удлинение снизилось с 25 до 12 %. Испытания на усталость проводились в условиях повторного растяжения (коэффициент асимметрии цикла $R = 0, 1$) с частотой 20 Гц и знакопеременного изгиба с вращением ($R = - 1$) с частотой 50 Гц. Кривые усталости исследованных серий образцов представлены на рис. 8. Видно, что у образцов серии 2 и 3 предел выносливости титана после РКУП + ТМТ возрос на 80 % по сравнению с исходным состоянием и сопоставим с пределом выносливости титанового сплава Ti-6Al-4V.

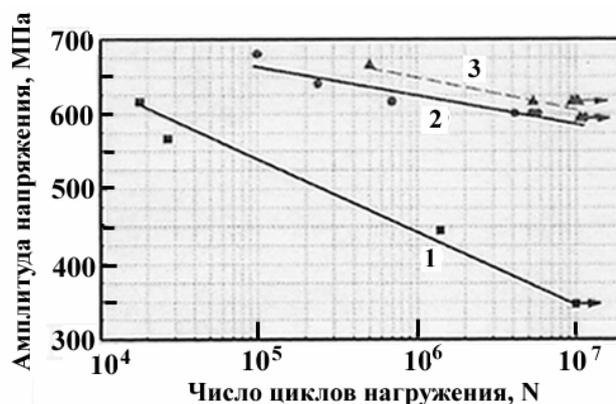
В работе [28] исследовали влияние РКУП на характеристики усталостной прочности образцов из технического чистого титана VT1-00 (вес. %: < 0,20Fe; < 0,08Si; < 0,10O₂; < 0,04N₂; < 0,008H₂). Заготовки для РКУП размерами 14 × 14 × 14 × 120 мм³ вырезались ионно-плазменной резкой из плиты толщиной 40 мм. РКУ прессырование осуществлялось в изотермических условиях при температуре ниже температуры рекристаллизации титана (не выше 420 °С) по маршруту Bc за 6 проходов. По разработанной методике РКУ прес-

Таблица 3 – Механические свойства Ti Grade: в различном структурном состоянии [18]

№	Режим обработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Удлинение, %	Равномерное удлинение, %
1	Состояние поставки	700	530	25	–
2	РКУП + ТМТ	1240 ± 10	1150 ± 20	11 ± 1	1,6
3	РКУП + ТМТ + отжиг 350 °С, 1 ч	1230 ± 10	1170 ± 30	12 ± 1	4,5
4	РКУП + ТМТ + отжиг 350 °С, 6 ч	1250 ± 10	1100 ± 10	13 ± 1	5,1



а



б

Рис. 8. Кривые усталости титана Grade 4: а – исходное состояние (кривая 1) и после РКУП + ТМТ (кривая 2) [17]; б – 1 – исходный материал; 2 – после РКУП + ТМТ; 3 – после РКУП + ТМТ и последующего отжига при 350 °С в течение 6 ч [18]

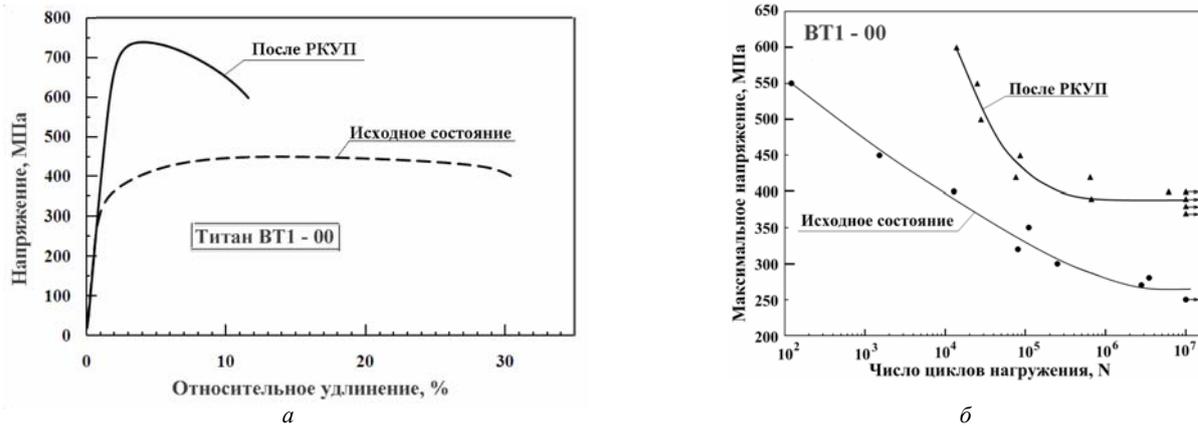
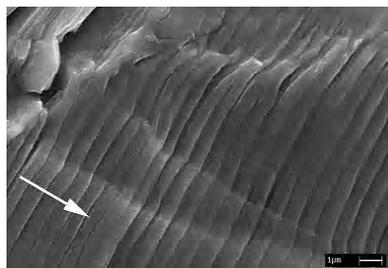


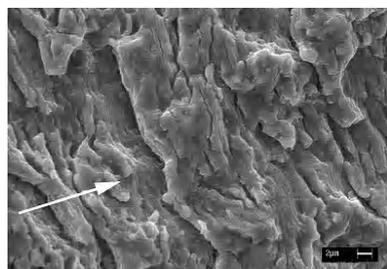
Рис. 9. Кривые статического растяжения (а) и усталости (б) титана VT1-00

сования получены заготовки субмикроструктурного (СМК) титана СМК размером $20 \times 20 \times 90$. Исходный размер зерна составлял 15 мкм, а после РКУП 300 нм. Плоские образцы с размером рабочей части $2 \times 3,5 \times 8$ мм вырезали из заготовки методом электроэрозионной резки. Эти образцы использовались для статических и усталостных испытаний в условиях повторного растяжения.

На рис. 9, а представлены кривые статического растяжения, а рис. 9, б кривые усталости исследованного материала. Видно, что РКУП титана VT1-00 к значительному повышению предела прочности (в 1,64 раза) и предела текучести (в 2,1 и 1,65), однако пластичность уменьшилась более чем в два раза. Предел выносливости σ_R после РКУП достигает ≈ 400 МПа, а отношение σ_R/σ_B после РКУП у них практически составляет 0,51.



а



б

Рис. 10. Фрактографическая картина распространения усталостной трещины в титане VT1-00:

а – исходное состояние; б – после РКУП; стрелками указано направление распространения трещины

Исследования особенностей механизма распространения усталостной трещины в исследованных материалах показали, что в отличие от крупнозернистых металлических материалов, в которых стабильное распространение усталостной трещины связано с пластичным бороздчатым рельефом поверхности разрушения (рис. 10, а), в случае СМК материалов наблюдается межзеренное разрушение, а также разрушение по механизму хрупкого бороздчатого рельефа и вторичного растрескивания вдоль бороздок (рис. 10, б).

Заключение

Ранние исследования по изучению влияния предварительной пластической деформации и размера на усталостную прочность титана показали, что предварительная пластическая деформация может снижать долговечность при малоциклового усталости. В области многоциклового усталости на долговечность и уровень предела выносливости после предварительной деформации влияет степень предварительной деформации и вид усталостного нагружения. Сильно также на характеристики усталостной прочности влияет среда и температура испытаний. Циклическая трещиностойкость снижается при уменьшении размера зерна.

Рассмотрение литературных данных по характеристикам циклической прочности титана и его сплавов после интенсивной пластической деформации по технологии РКУП показывает, что эта технология позволяет существенно повысить не только статические механические прочностные свойства, но и характеристики многоциклового усталости (долговечность и предел усталости). Характеристики малоциклового усталости СКМ – титана из-за достаточного запаса циклической пластичности практически не ухудшаются по сравнению с его крупнозернистым аналогом. Это достигается в основном за счет уменьшения размера зерна и механизмов дислокационного упрочнения. Однако снижение пластичности после РКУП приводит к повышению чувствительности к концентраторам напряжений и снижению характеристик циклической трещиностойкости. Зависимость механических харак-

теристик от размера зерна подчиняется уравнению Холла-Петча. У СМК титана наблюдается более интенсивное циклическое упрочнение по сравнению с крупнозернистым материалом. В СМК – титане крупномасштабные полосы сдвига в процессе циклического деформирования не наблюдаются, а зарождение поверхностных усталостных микротрещин происходит по границам зерен.

Список литературы

- Hempel M. Dauerfestigkeitsuntersuchungen an Reintitan / Hempel M., Hillnhagen E. // Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1962. – Vol. 33. – N 8. – P. 567–581.
- Golland D. I. Some effects of prior deformation and annealing on the fatigue response of α -titanium / Golland D. I., Beevers C. J. // J. Less. – Common Metals, 1971. – Vol. 23. – N 1. – P. 53–60.
- Dickson J.I. Cyclic Behavior and Delayed Softening of Commercial Purity Titanium / Dickson J.I., Ducher J., Plumtree A. // Metallurgical Transactions A, 1976. – Vol. 7A. – N 10. – P. 1559–1565.
- Иванова В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М. : Metallurgiya, 1975. – 455 с.
- Ратнер С. И. Разрушение при повторных нагрузках / С. И. Ратнер. – М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1959. – 352 с.
- Черняк Н. И. Механические свойства стали в области малых пластических деформаций / Н. И. Черняк. – М. : Изд-во АН УССР, 1962. – 104 с.
- Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 393 с.
- In : Proc. of the Fourth Conference on nanostructured materials (NATO-98) / [Zhernakov V. S., Latysh V. V., Stolyarov V. V. etc.] – Stockholm, 1998. – 609 p.
- Деформационное поведение и разрушение при циклическом нагружении титановых сплавов, подвергнутых равноканальному угловому прессованию / [Кашин О. А., Дударев Е. Ф., Колобов Ю. Р. и др.] // Физическая мезомеханика. – 2004. – Спец. вып. – Ч. 2. – С. 111–114.
- Эволюция структуры и механических свойств наноструктурного титана при термомеханических обработках / [Кашин О. А., Дударев Е. Ф., Колобов Ю. Р. и др.] // Материаловедение, 2003. – № 8. – С. 25–30.
- Kim W.-J. Fatigue strength of ultrafine – grained pure Ti after severe plastic deformation / Kim W.-J., Hyun C.-Y., Kim H.-K. // Scr. Mater. – 2006. – 54, №10. – С. 1745–1750.
- Mechanical Properties of Severely Plastically Deformed Titanium / [Zeipper L., Zehetbauer M., Mingler B. etc.] // Proceedings of the Conference «Nanomaterials by Severe Plastic Deformation-NANOSPD2», December 9–13, 2002, Vienna, Austria. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2002. – P. 810–816.
- Локализация макродеформации в субмикроструктурном титане / [Данилов В. И., Зуев Л. Б., Болотина И. О. и др.] // Физика металлов и материаловедение. – 2008. – Т. 106. – № 3. – С. 322–328.
- Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy with Submicrocrystalline Structure Produced by Severe Plastic Deformation / [Zherebtsov S., Salishchev G., Galeev R. etc.] // Materials Transactions. – 2005. – Vol. 46. – N 9. – P. 2020–2025.
- Жеребцов С. В. Механические свойства субмикроструктурного титанового сплава ВТ6 / С. В. Жеребцов, Г. А. Салищев, Р. М. Галлеев // Структура и свойства нанокристаллических материалов : сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН. – 1999. – С. 195–203.
- Cycling of ultrafine – grained Ti-6Al-4V alloy : microstructural changes and enhanced fatigue limit / [Saitova L. R., Huppel H. W., Guken M. etc.] // Nanomaterials by Severe Plastic Deformation IV. Part 2 (Selected, peer reviewed papers from the 4th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Goslar, Germany, August 18–22, 2008. Edited Yuri Estrin and Hans Jurgen Maier). Trans tech publications ltd, Switzerland – UK-USA. – 2008. – P. 827–832.
- Nanostructured SPD Processed Titanium for Medical Implants / [Valiev R. Z., Semenova I. P., Jakushina E. etc.] // Nanomaterials by Severe Plastic Deformation IV. Part 1 (Selected, peer reviewed papers from the 4th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Goslar, Germany, August 18–22, 2008. Edited Yuri Estrin and Hans Jurgen Maier). Trans tech Publication LTD, Switzerland-UK-USA, 2008. – P. 49–54.
- Якушина Е. Б. Влияние интенсивной пластической деформации на усталостные свойства длинномерных Ti прутков с ультрамелкозернистой структурой / Е. Б. Якушина, И. П. Семенова, Р. З. Валиев // Кузнечно-штамповое производство, 2008. – № 12. – С. 13–18.
- Owens J. P. The effect of prestrain on the cyclic behaviour of α - titanium / Owens J. P., Watson P., Plumtree A. // Mechanical Behavior of Materials. Proceedings of the 1971 International Conference on Mechanical Behavior of Materials, vol. II, The Society of Materials Science, Japan, 1972/ – P. 131–142.
- Усталость деформационно – упрочненного титана / [В. П. Северденко, В. В. Петренко, М. И. Калачев и др.] // Физика и химия обработки материалов, 1976. – № 4. – С. 89–92.
- Калачев Б. А. Механические свойства титана и его сплавов / Б. А. Калачев, В. А. Ливанов, А. А. Буханова. – М. : Metallurgiya, 1974. – 236 с.
- Turner N. G. Fatigue behaviour of titanium / Turner N. G., Roberts W. T. // Trans. AIME 242, 1968. – P. 1223–1230.
- Robinson J. L. The Effects of Load Ratio, Interstitial Content, and Grain Size on Low-Stress Fatigue-Crack Propagation in α -Titanium / Robinson J. L., Beevers C. J. // Metal Science Journal, 1973. – Vol. 7. – P. 153–159.
- Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Валиев Р. З., Александров И. В. – М. : Логос, 2000. – С. 239–243.
- Vinogradov A. Yu. Nanocrystalline Materials: Fatigue / Vinogradov A. Yu., Agnew S. R. // Encyclopedia of nanoscience and nantechnology, New York : Marcel Dekker, 2004. – P. 2269 – 2288.
- Cyclic behavior of ultrafine – grain titanium produced by severe plastic deformation / [Vinogradov A., Stolyarov V. V., Hashimoto S. etc.] // Materials Science and Engineering A318, 2001. – P. 163–173.
- Hanlon T. Fatigue behavior of nanocrystalline metals and alloys / Hanlon T., Tabachnikova E. D., Surech S. // International Journal of Fatigue, Issues 10–12, October-December 2005. – Vol. 27. – P. 1147–1158.
- Влияние равноканального углового прессования на ус-

талостную прочность титана и циркониевого сплава /
[В. Ф. Терентьев, С. А. Добаткин, С. А. Никулин и др.] //

Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 8. –
С. 26–33.

Одержано 07.02.2011

Терентьев В.Ф. Вплив попередньої деформації та розміру зерна на втомну міцність титану та його сплавів (огляд)

Розглянуто вплив попередньої пластичної деформації (в тому числі й інтенсивної пластичної деформації) та розміру зерна на характеристики втомної міцності за кімнатної температури титану та його сплавів.

Ключові слова: титан та його сплави, розмір зерна, інтенсивна пластична деформація, втомна міцність.

Terentiev V. The prestrain deformation and grain size influence on fatigue strength of titanium and it's alloys fatigue strength (the overview)

The influence of prestrain plastic deformation (including intensive plastic deformation) and grain size on titanium and its alloys fatigue strength characteristics is considered.

Key words: titanium and it's alloys, grain size, intensive plastic deformation, fatigue strength.

УДК 669.017

Д-р техн. наук А. Д. Коваль, д-р техн. наук М. Н. Брыков,
А. Е. Капустян, Д. Н. Тимофеевко

Национальный технический университет, г. Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ НИЖНЕГО БЕЙНИТА В СТРУКТУРЕ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Представлены результаты эксперимента по формированию структуры нижнего бейнита в стали типа 120Г3 при температуре изотермической выдержки 200 °С. Время до начала бейнитного превращения при данной температуре составляет $5 \cdot 10^5$ с (5,8 суток). Уже через 10^6 с макротвердость стали увеличивается с HV 260 до HV 540. Микротвердость участков бейнита достигает H_{50} 650 (~ 55 HRC).

Ключевые слова: высокоуглеродистые стали, изотермическая выдержка, нижний бейнит, кинетика образования, твердость.

Надежность деталей машин и конструкций в условиях действия нагрузок различной динамики и локализации определяется способностью материалов сопротивляться разрушению, т.е. зарождению и распространению трещин. На ранних этапах понимания природы разрушения основной характеристикой материала, отвечающей за надежность изделия в эксплуатации, считали статическую прочность при однократном нагружении. Обширный опыт катастроф ответственных сооружений привел к необходимости более глубокого рассмотрения механизма разрушения и нахождения дополнительных характеристик материалов, определяющих пределы их безопасной эксплуатации.

К настоящему времени сформировалось самостоятельное научное направление – механика разрушения материалов. В ее основе лежит постулат о том,

что любое реальное тело содержит, по крайней мере, одну трещину. На стадии роста под влиянием внешних нагрузок трещина относительно медленно увеличивается до некоторой критической длины, после чего наступает стадия быстрого распространения трещины, что вызывает якобы внезапное самопроизвольное разрушение детали.

Широко распространены методы обработки, повышающие сопротивляемость материалов образованию трещин. К этим методам относятся различные варианты упрочнения: холодная пластическая деформация, закалка на мартенсит, дисперсионное упрочнение (старение пересыщенных твердых растворов), термомеханическая обработка. Эти методы позволяют значительно повысить механические характеристики – предел прочности, предел текучести и предел усталости.

Однако увеличение прочности, как правило, свя-