

# 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 исследования 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].

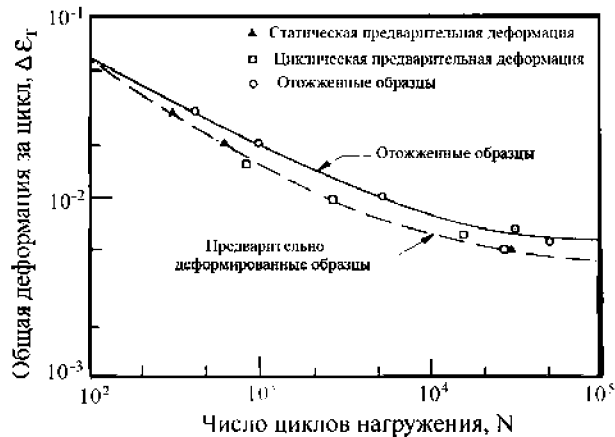


Рис. 1. Кривые малоциклового усталости технически чистого титана [19]

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  $\text{мм}^2$ ) на циклическую прочность технически чистого отожженного  $\alpha$ -титана Ti 120 (0,087O<sub>2</sub>; 0,01N<sub>2</sub>; 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

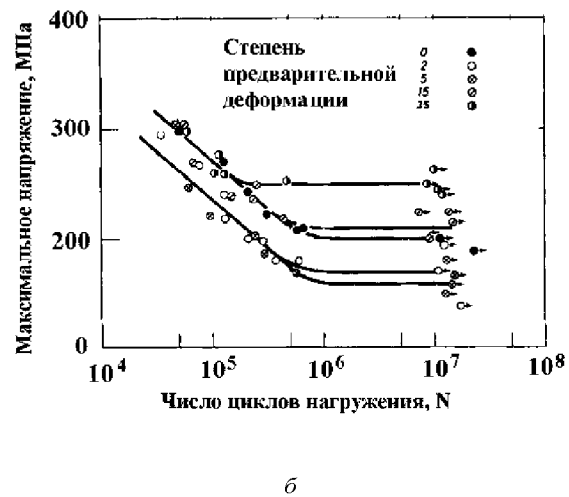
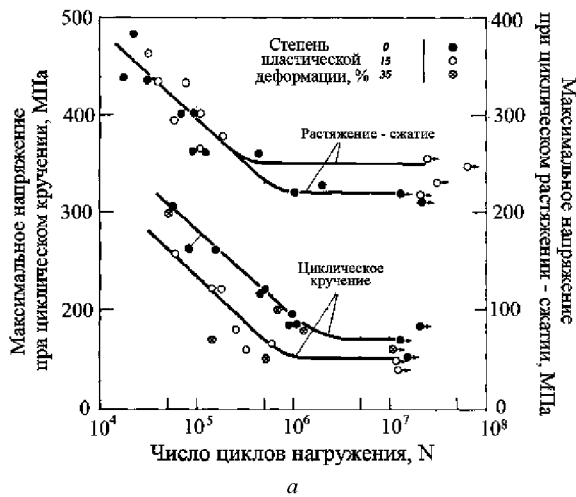


Рис. 2. Влияние предварительной деформации растяжением на циклическую прочность титана в условиях симметричного растяжения – сжатия и кручения (а) и в условиях симметричного плоского изгиба (б) [1]

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  $\sigma_R/\sigma_B$  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

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

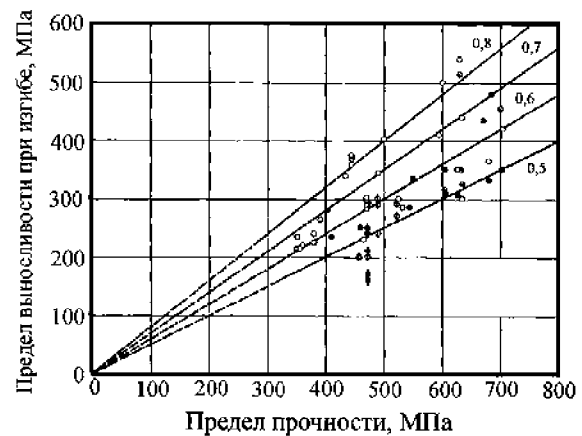


Рис. 3. Зависимость предела выносливости при знакопеременном изгибе чистого титана при комнатной температуре от предела прочности [1]:

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

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 | $\sigma_{0,2}$ ,<br>Мн/м <sup>2</sup> | $\sigma_B$ ,<br>Мн/м <sup>2</sup> |
|--------|-------|--------|-------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Ti 115 | 0,095 | 0,0080 | 0,010 | 3 ч, 973 К<br>24 ч, 1123 К | 0,035<br>0,23            | 260<br>220                            | 360<br>390                        |
| Ti 130 | 0,160 | 0,0085 | 0,030 | 3 ч, 1123 К                | 0,040                    | 430                                   | 520                               |
| Ti 155 | 0,340 | 0,0075 | 0,020 | 3 ч, 923 К<br>24 ч, 1273 К | 0,020<br>0,21            | 630<br>580                            | 720<br>590                        |

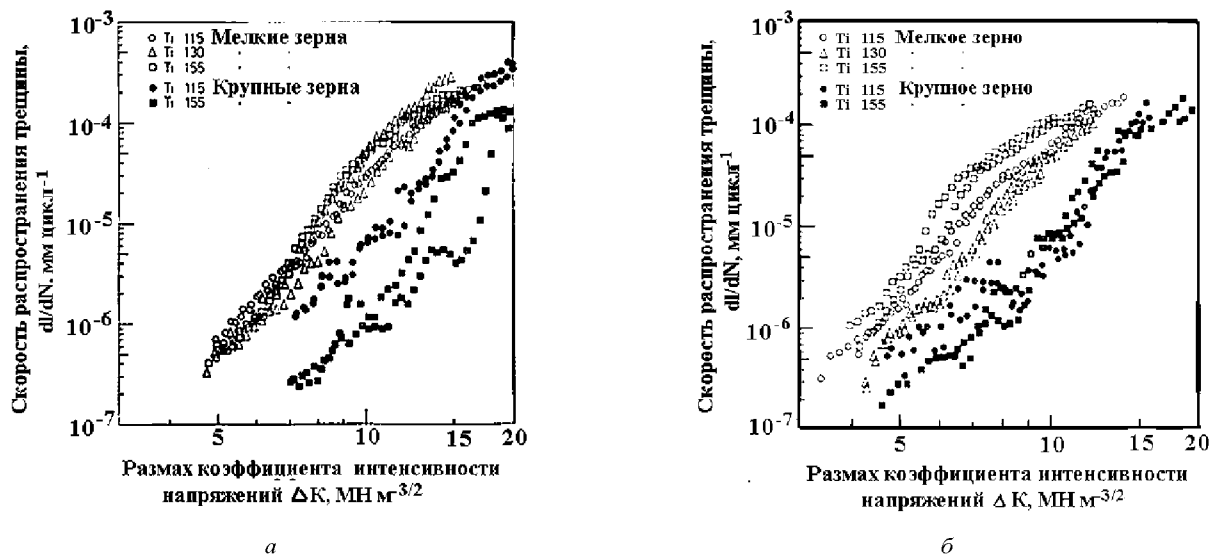


Рис. 4. Влияние размера зерна, содержания примесей внедрения и асимметрии цикла нагружения на циклическую трещиностойкость технического титана (*a* – асимметрия цикла  $R = 0,07$ ; *б* –  $R = 0,35$ ) [23]

Было показано [23], что изменение концентрации примесей сильно влияет на  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  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  $\Delta K$  с увеличением концентрации примесей внедрения. Усталостные трещины распространяются внутризменно и путь распространения трещин при низких  $\Delta K$  контролируется ориентировкой зерен. Многие зерна при этом разрушаются по серии параллельных плоскостей, в результате чего образуются фасетки, напоминающие фасетки скола. При высоких значениях  $\Delta K$  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  $\Delta K$  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<sup>-2</sup>). Состояние 2 характеризуется волокнистой в осевом направлении структурой с размером зерна 0,15 мкм и более высокой плотностью дислокаций  $10^{14}$ – $10^{15}$  м<sup>-2</sup>.

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<sup>-2</sup>, 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 зёрнами размером 5–7 мкм

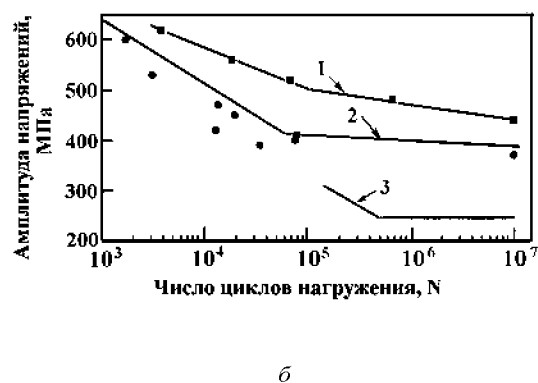
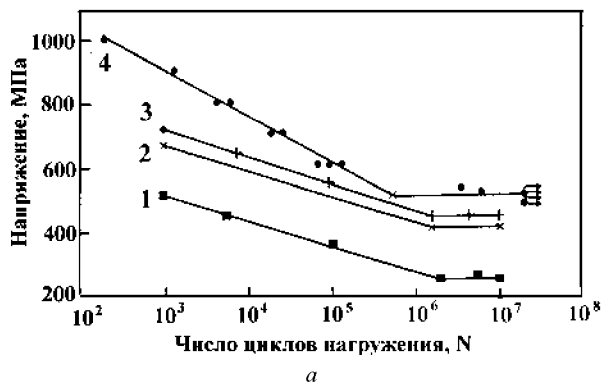


Рис. 5. Кривые усталости для исходного (1) и наноструктурного титана с равноосной (2), волокнистой (3) и фрагментированной (4) структурой [8, 24] (а) и кривые усталости титана с различным размером зерна [25] (б):

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

с плотностью дислокаций  $10^9 \text{см}^{-2}$ . 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  $\alpha$ - 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 технического 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 РКУПД 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 характеристики 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  $\Delta K_{th}$  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  $\alpha$ - и  $\beta$ - 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

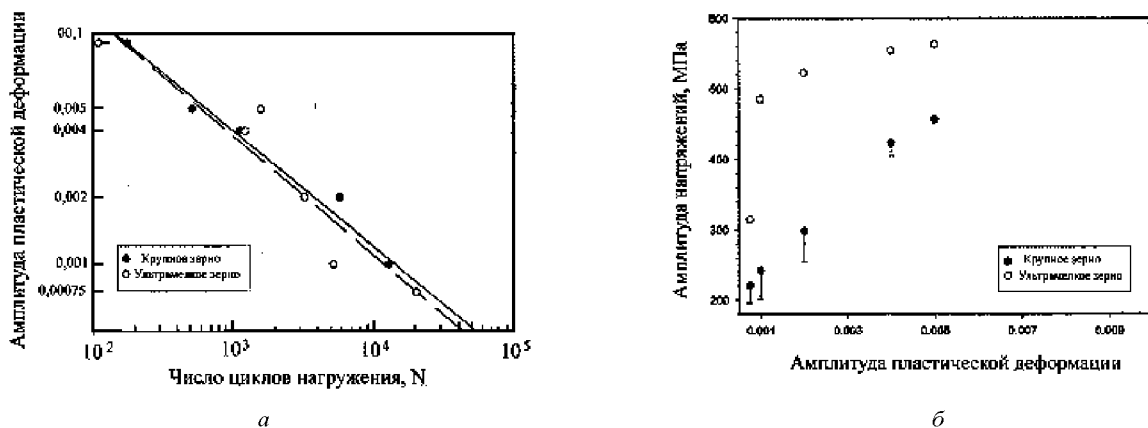


Рис. 6. Влияние размера зерна титана на кривые малоциклового усталости (а) и кривые циклического деформирования титана (б) [26]

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 увеличивался 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.

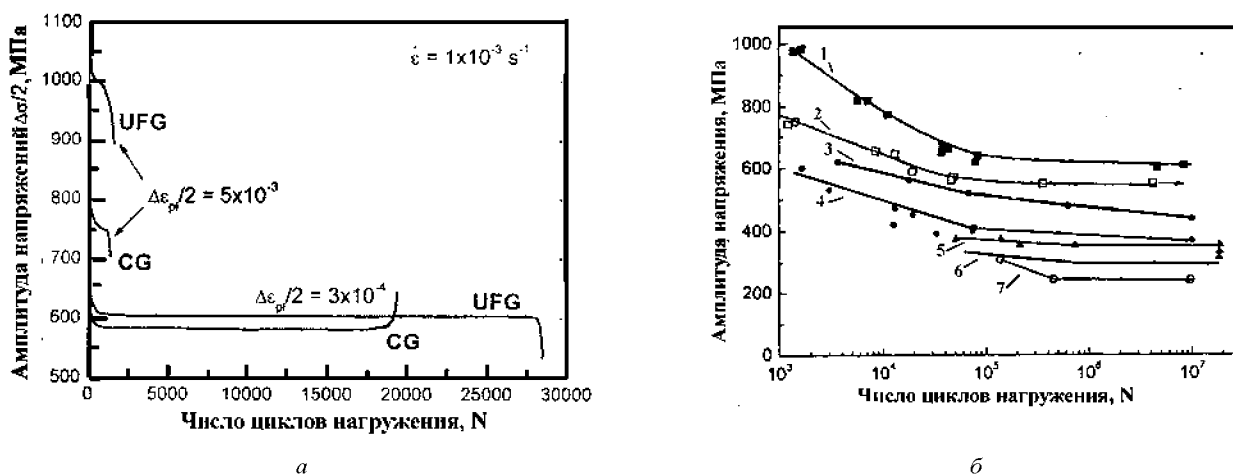


Рис. 7. Кривые циклического упрочнения / разупрочнения сплава Ti-6Al-4V (а) [16] и кривые усталости титана и его сплавов с различным размером зерна (б): 1,2 – СМК и крупнозернистый титановый сплав соответственно [16]; 3,4 – СМК – Ti [25, 26]; 5, 6 – СМК и крупнозернистый титановый сплав соответственно [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  $90^\circ$ , 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

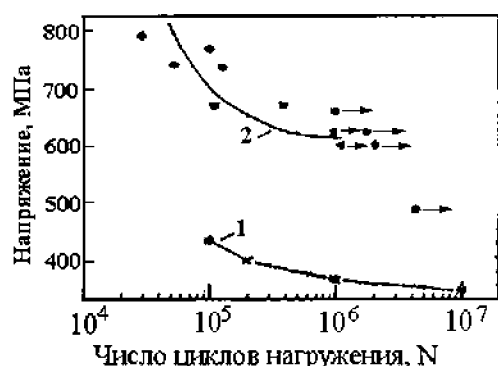
возрос с 700 до 1240 МПа, условный предел текучести – с 530 до 1200 МПа, а удлинение снизилось с 25 до 12 %. Испытания на усталость проводились в условиях повторного растяжения (коэффициент асимметрии цикла  $R = 0, 1$ ) с частотой 20 Гц. Механические свойства Ti Grade 4 в различном структурном состоянии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

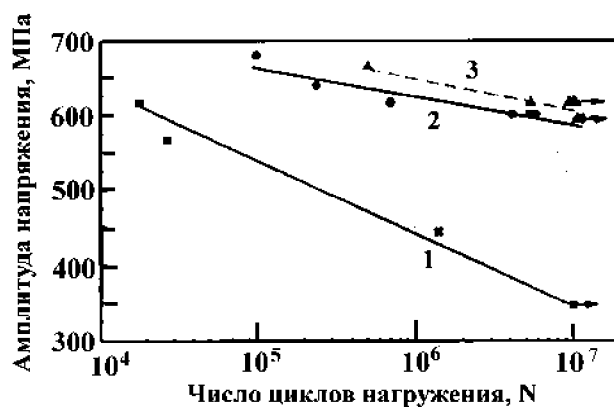
В работе [28] исследовали влияние РКУП на характеристики усталостной прочности образцов из технического чистого титана VT1-00 (вес. %: < 0,20Fe; < 0,08Si; < 0,10O<sub>2</sub>; < 0,04N<sub>2</sub>; < 0,008H<sub>2</sub>). Заготовки для РКУП размерами 14 × 14 × 14 × 120 мм<sup>3</sup> вырезались ионно-плазменной резкой из плиты толщиной 40 мм. РКУ пресование 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                | $\sigma_B$ , 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]

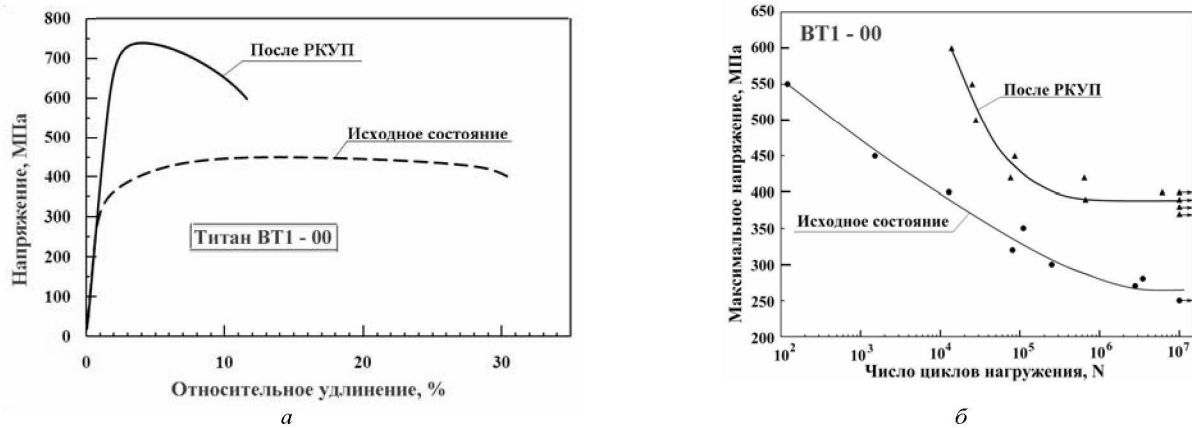
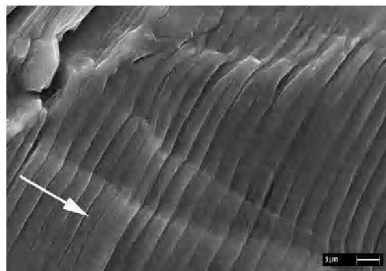


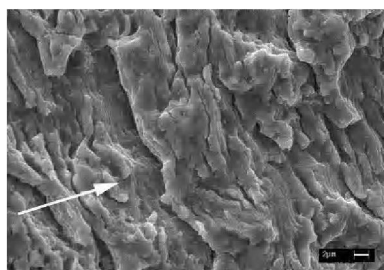
Рис. 9. Кривые статического растяжения (а) и усталости (б) титана VT1-00

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  $\sigma_R$  после РКУП достигает  $\approx 400$  МПа, а отношение  $\sigma_R/\sigma_B$  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  $\alpha$ -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. : Металлургия, 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 / [Zepper 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., Gucken M. etc.] // Nanomaterials by Severe Plastic Deformation IV. Part 2 (Selected, peer reviewed papers from the 4<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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  $\alpha$  - 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. : Металлургия, 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  $\alpha$ -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. : Лорос, 2000. – С. 239–243.
- Vinogradov A. Yu. Nanocrystalline Materials: Fatigue / Vinogradov A. Yu., Agnew S. R. // Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology, 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.

---