

УДК 620.22:539.4

**В. С. ЖЕРНАКОВ, И. П. СЕМЕНОВА, А. Н. ЕРМОЛЕНКО****ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ  
НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ**

Описаны напряженно-деформированное состояние и усталостные свойства объемного наноструктурного чистого титана и его сплава ВТ6, подвергнутых равноканальному угловому прессованию. Проведена проверка малоциклового усталости резьбовых деталей из объемного наноструктурного чистого титана в сравнении со сплавом ВТ6. *Объемные наноматериалы ; усталостные испытания ; РКУП ; концентрация напряжений ; малоцикловая усталость ; резьбовые детали*

**ВВЕДЕНИЕ**

Титан и его сплавы благодаря высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и биосовместимости широко используются в качестве конструкционных материалов для изготовления элементов крепежа в машиностроении и медицинских устройств. Основным требованием к таким конструкционным материалам является их работоспособность при переменных нагрузках. Одним из путей повышения усталостных свойств является создание объемной наноструктуры в титановых материалах методами интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяющее достичь сильного измельчения микроструктуры за счет больших деформаций [1]. Наиболее широко используемый метод ИПД – равноканальное угловое прессование (РКУП), позволяет получать длинномерные заготовки различных поперечных сечений.

Усталость элементов конструкций определяется их высокой нагруженностью. Требование высокой весовой эффективности конструкций делает обязательным более полное использование резервов прочности материалов, так как минимальная масса конструкции – не просто решение важной задачи о снижении металлоемкости изделий, а одно из важнейших условий обеспечения необходимых технических и экономических характеристик. Высокая весовая эффективность требует не только использования всех резервов прочности и пластичности для обеспечения статической прочности, но и предусматривает возможно более высокую напряженность при нормальной эксплуатации,

что, естественно, сильно осложняет решение задачи обеспечения необходимого уровня сопротивления усталости конструкций.

Широкое внедрение ЭВМ в практику проектирования помогает в проведении расчетов усталостной долговечности элементов конструкций, но и за счет устранения избытков прочности, имевшихся при менее совершенных расчетах статической прочности, обостряет опасность преждевременных усталостных разрушений, в связи с чем приходится увеличивать объемы работ по расчету и экспериментальной отработке ресурса элементов конструкций.

Другой фактор, также связанный с требованиями минимизации массы конструкции – широкое применение в силовой конструкции материалов, имеющих большую удельную прочность. Это алюминиевые сплавы с пределом прочности более 400 МПа, титановые сплавы с  $\sigma_{пч} > 800$  МПа и стали с  $\sigma_{пч} > 1600$  МПа. Однако увеличение прочности сплавов не сопровождается соответствующим ростом сопротивления усталости, относительное сопротивление усталости высокопрочных материалов, как правило, ниже, чем у среднепрочных сплавов. Для высокопрочных сплавов характерны также большая чувствительность к концентрации напряжений и чистоте поверхности, и поэтому относительное сопротивление усталости элементов конструкций из высокопрочных сплавов еще ниже, чем для простых образцов материалов [2].

Еще один фактор, определяющий усталость конструкций – огромное число разнообразных концентраторов напряжений: отверстий под болты и заклепки, сварные швы и точки, переходы толщин, галтелей и т. д. Все они – потен-

циальные источники усталостных разрушений. Можно отметить, что все усталостные разрушения – и преждевременные, и «своевременные», т. е. обнаруженные в испытаниях после наработки нескольких ресурсов, обусловлены каким-либо концентратором напряжений.

В настоящей работе приведены результаты усталостной прочности элементов конструкций из объемных наноматериалов с учетом полей пластических деформаций, рассчитанных с учетом технологической наследственности.

### 1. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ (НДС) ЗАГОТОВОК ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ напряженно-деформированного состояния в заготовке при равноканальном угловом прессовании (РКУП) показывает, что размеры и форма зон распределения максимальных значений интенсивности напряжений и деформаций в заготовке значительно изменяются в ходе технологического процесса.

На рис. 1.1 показаны поля эффективной пластической деформации  $\varepsilon_{eqv}^{pl}$  на поверхности, в продольном вертикальном и горизонтальном сечении заготовки после первого прохода РКУП. Наблюдается существенная неравномерность эффективной пластической деформации на верхней и нижней контактной поверхности, а также в хвостовых частях заготовки. Установлено, что максимальное значение эффективной пластической деформации составляет не менее 1,1. При этом неравномерность эффективной пластической деформации по высоте заготовки не превышает 0,5.

Анализируя расчетные данные, полученные для последующих проходов РКУП, многократного деформирования образцов, с целью дальнейшего измельчения структуры, можно отметить, что уровень накопленных пластических деформаций в образцах хорошо согласуется с экспериментальными данными, при этом ось деформаций имеет шаг  $\sim 1,15$ , что соответствует теоретическому уровню прироста деформаций за один проход. На рис. 1.2, а показаны поля эффективной пластической деформации  $\varepsilon_{eqv}^{pl}$  на поверхности заготовки после четвертого прохода РКУП [3], максимальное значение эффективной пластической деформации составляет 4,2. На рис. 1.2, б показано сечение образца после 4 проходов РКУП в «рабочей части», с наиболее равномерным распределением деформаций в сечении. После многократного деформирования

заметно увеличиваются зоны неравномерности деформаций в хвостовых частях образцов. Рассматривая третий и четвертый проходы, можно отметить, что неравномерность распределения деформаций увеличивается.

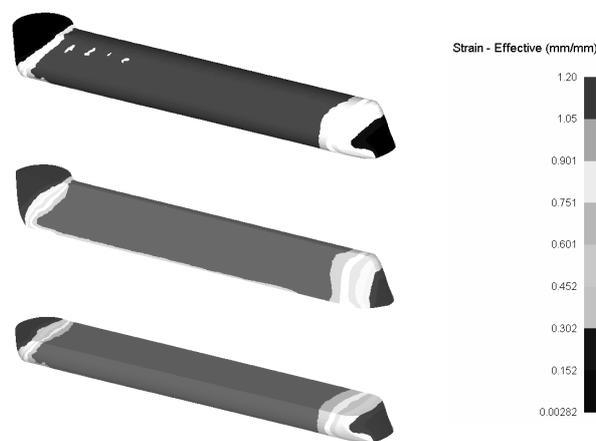


Рис. 1.1. Поля эффективной пластической деформации в заготовке после первого прохода РКУП

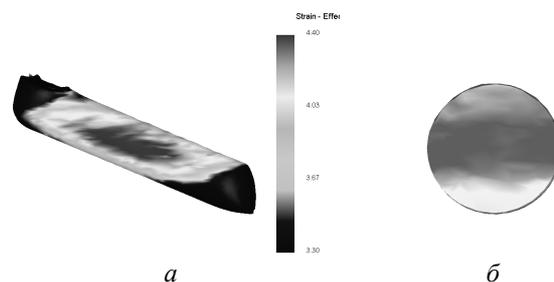


Рис. 1.2. Поля эффективной пластической деформации в заготовке после четвертого прохода РКУП

В целом, после нескольких проходов РКУП сохраняется идентичная картина неравномерности распределения деформаций по высоте образца. На рис. 1.3 показан график роста деформаций [4], при четырех переходах РКУП, в среднем сечении образца, взятый по высоте сечения образца. Видно, что расчетные данные, полученные путем численного моделирования, подтверждают теоретические зависимости, причем рост деформаций между проходами составляет  $1,15 \div 1,2$ .

Моделирование обкатки заготовки роликом, с учетом истории нагружения после 4 проходов РКУП, позволяет судить об уровне накопленных пластических деформаций в получаемой детали. На рис. 1.4, а представлен внешний вид заготовки из титана после обработки накатным роликом и распределение накопленной пластической деформации по наружной поверхности

заготовки. На рис. 1.4, б показано распределение накопленной пластической деформации в осевом сечении заготовки в области канавки. В области образования канавки уровень накопленной пластической деформации составляет  $\epsilon_{eqv}^{pl} = 4,92$ , т. е. максимальный уровень накопленной пластической деформации в этой области увеличился на 10,5% по сравнению с четвертым проходом РКУП.

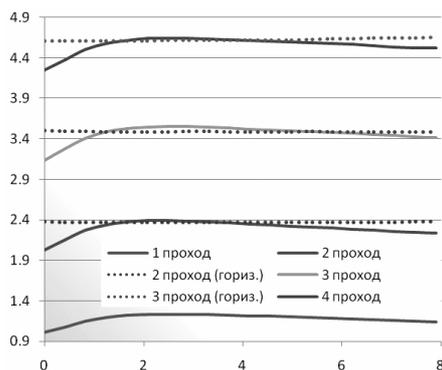


Рис. 1.3. Распределение интенсивности деформаций в среднем сечении образца в ходе 4 проходов РКУП

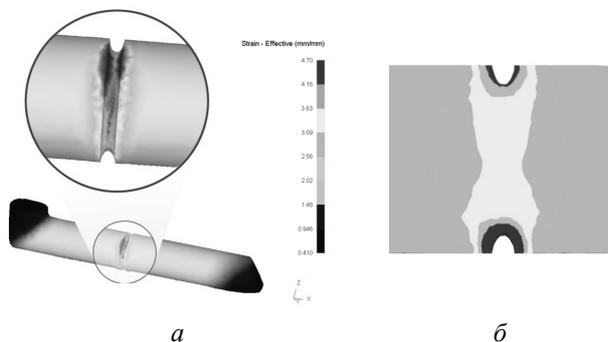


Рис. 1.4. Цилиндрическая накатанная канавка и распределение в ней накопленной пластической деформации

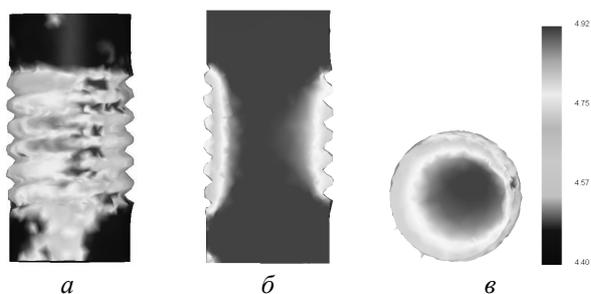


Рис. 1.5. Распределение накопленной пластической деформации в детали с резьбой после 4 проходов РКУП

Моделирование получения резьбовой детали путем накатки плашкой из заготовок из объемных наноструктурных материалов, полученных после 4 проходов РКУП, позволяет оценить НДС сложной детали с учетом истории нагружения [3]. На рис. 1.5, а показано распределение накопленной пластической деформации по наружной поверхности заготовки, а на рис. 1.5, б – в осевом сечении резьбы. На рис. 1.5, в показано распределение эффективных пластических деформаций в поперечном сечении резьбы.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА И СПЛАВА ВТ6

При экспериментальных исследованиях свойств технически чистого титана, его микроструктура в прутках после комбинированной обработки в поперечном сечении характеризуется наличием равноосных зерен и субзерен со средним размером около 200 нм и высокой плотностью дислокаций. Дальнейшее повышение усталостных свойств в УМЗ титановых материалах за счет получения повышенной пластичности в сочетании с высокой прочностью возможно за счет увеличения вклада равномерной деформации в удлинение при растяжении после отжига деформированных прутков. В результате исследований было установлено, что наилучшее сочетание прочности и пластичности было достигнуто после отжига при 350°C в течение 6 часов, что связано наряду с сохранением ультрамелкого зерна (до 200 нм) со значительным снижением внутренних упругих напряжений в структуре, изменением состояния границ зерен в результате перераспределения дислокаций и дополнительным их закреплением на границах за счет выделения сегрегаций примесей. Так, например, предел прочности чистого титана после данной обработки составляет  $\sigma_{пч} = 1250$  МПа в сравнении с  $\sigma_{пч} = 700$  МПа в состоянии поставки, а относительное остаточное удлинение наноструктурного титана составляет  $\delta = 13\%$  против  $\delta = 25\%$  состояния поставки.

В таблице приведены механические свойства образцов из сплава ВТ6 в исходном состоянии, после РКУП и последующей экструзии. Для сравнения в таблице представлены результаты механических испытаний образцов после упрочняющей термической обработки и после экструзии без РКУП. Видно, что экструзия без

РКУП и стандартная термообработка приводят к увеличению прочности крупнозернистого сплава с одновременным снижением пластичности до  $\delta=5\div7\%$  соответственно (таблица, №5 и №6).

Механические свойства сплава Ti-6Al-4V ELI в исходном состоянии и после РКУП и экструзии

Обработка	$\sigma_{пч}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
1. Исходное состояние	940	840	19	—
2. РКУП	1080	1000	12	—
3. РКУП + экструзия при 20 °С с промежуточными отжигами 300 °С, 1 час	1380	1100	8	39
4. РКУП + экструзия при 300 °С	1370	1050	10	48
5. Стандартная упрочняющая термическая обработка (закалка 1030 °С + старение 500 °С, 8 часов)	1000	960	5	—
6. Исходное состояние + экструзия при комнатной температуре	1110	1060	7	—

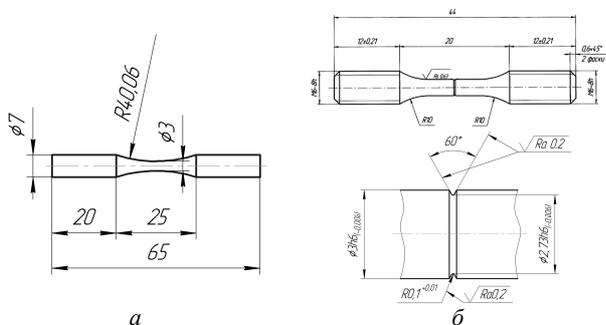


Рис.2.1. Вид образцов для усталостных испытаний

Испытания образцов проводились в условиях изгиба с вращением с частотой  $f = 50$  Гц, при симметричном цикле нагружения и базе испытаний  $N_0 = 10^7$  в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Вид образцов представлен на рис. 2.1, а. Рабочую поверхность цилиндрических гладких образцов для усталостных испытаний подвергали шлифовке и механической полировке с обеспечением шероховатости  $Ra 0,63$  мкм. Размеры и форма канавки цилиндрических образцов с надрезом представлены на рис. 2.1. Коэффициенты концентрации упругих напряжений  $\alpha_t$  составляли для каждого вида надреза с радиусом 0,1, 0,2 и 0,3 мм соответственно 4,4, 3,9, 3,3. Поверх-

ность канавки образцов полировали до степени шероховатости  $Ra 0,2$  мкм.

На рис. 2.2 показан график зависимости числа циклов  $N$  от амплитуды напряжений гладких образцов из УМЗ и обычного КЗ титана. Видно, что предел выносливости УМЗ титановых образцов в данном эксперименте увеличился с 350 до 595 МПа, также как и на УМЗ образцах, испытанных в условиях циклического растяжения на базе  $10^6$  циклов. При этом видно, что предел выносливости образцов после отжига при 350°С увеличился до 610 МПа в результате повышения прочности и пластичности материала.

Усталостные испытания гладких образцов из УМЗ Ti-6Al-4V были проведены на прутках, полученных по отработанной для этого сплава технологии, включающей РКУП, теплую экструзию и отжиг при 500°С, 2 часа. Образцы достигли предела выносливости 740 МПа после  $10^7$  циклов испытаний. Результаты испытаний УМЗ сплава в сравнении со стандартным состоянием после горячей прокатки приведены на рис. 2.3.

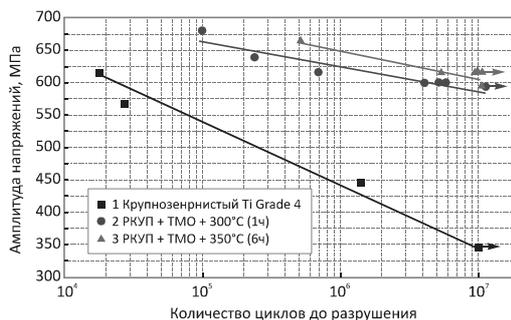


Рис.2.2. Зависимость числа циклов  $N$  от амплитуды напряжений гладких образцов из обычного КЗ титана, УМЗ титана после РКУП + ТМО и УМЗ титана после РКУП + ТМО + отжиг при 350 °С в течение 6 часов

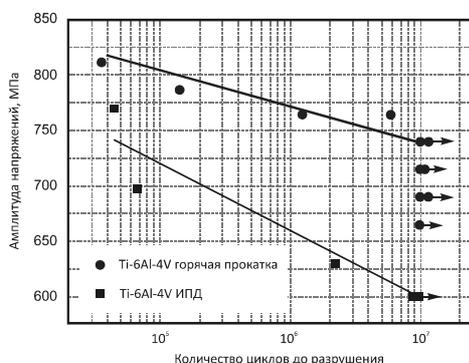


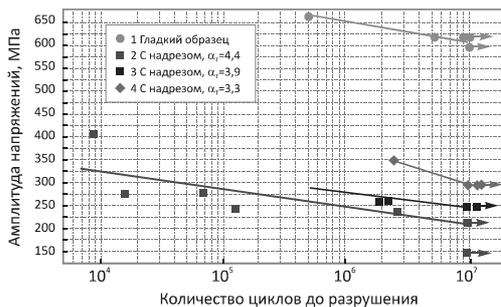
Рис.2.3. Результаты усталостных испытаний гладких образцов из УМЗ Ti-6Al-4V ELI в сравнении с его крупнозернистым аналогом после горячей прокатки

Используя результаты испытаний для гладких образцов и образцов с надрезом, была проведена оценка параметров усталостной чувствительности к надрезу  $q$  согласно соотношениям (1) и (2):

$$K_{\sigma} = \sigma_{-1(\text{гладкие})} / \sigma_{-1(\text{с надрезом})}; \quad (1)$$

$$q_{\sigma} = \frac{K_{\sigma} - 1}{\alpha_t - 1}, \quad (2)$$

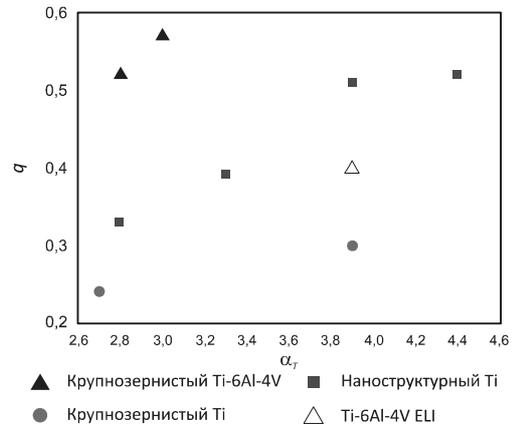
где  $\alpha_t$  и  $K_{\sigma}$  – теоретический и эффективный коэффициенты концентрации напряжений, соответственно;  $\sigma_{-1(\text{гладкие})}$  и  $\sigma_{-1(\text{с надрезом})}$  – напряжения, при которых образцы не разрушаются после  $10^6$  циклов нагружения. На рис. 2.4 представлены кривые зависимости напряжения от числа циклов нагружения для образцов с различной формой надреза. Как было показано ранее, предел выносливости гладких образцов на базе  $10^7$  циклов составлял 615 МПа (рис. 2.3). Надрез, как известно, снижает предел выносливости материала, а его величина зависит от размеров (глубины  $h$ , радиуса  $\rho$ ) надреза (рис. 2.4). Видно, что образцы с надрезом, имеющие наибольший  $\alpha_t = 4,4$ , выдерживают нагрузку с максимальным напряжением 220 МПа в течение  $10^7$  циклов (кривая 2). С уменьшением коэффициента концентрации  $\alpha_t$  до значения 3,3 максимальное напряжение возросло до 295 МПа (кривая 4). Для сравнения, по результатам, полученным ранее, образцы с  $\alpha_t = 2,8$  имели предел выносливости 395 МПа [3].



**Рис. 2.4.** Зависимость напряжения от числа циклов нагружения для УМЗ образцов с различной геометрией надреза

Видно, что на чувствительность к надрезу УМЗ титана сильное влияние оказывает геометрия надреза: с увеличением коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_t$  от 2,8 до 4,4 повышается коэффициент  $K_{\sigma}$  от 1,59 до 2,77 и  $q$  от 0,33 до 0,53 (рис.2.5). При этом УМЗ титан имеет повышенную чувствительность к надрезу по

сравнению с обычным крупнозернистым аналогом титана ( $q = 0,24$  при  $\alpha_t = 2,7$ ).



**Рис. 2.5.** Усталостная чувствительность к концентратору исследуемых сплавов

Усталостная долговечность УМЗ титана на гладких образцах находится практически на уровне медицинского сплава Ti-6Al-4V ELI, несмотря на более высокую прочность (1250 и 950 МПа, соответственно). Поскольку сплав Ti-6Al-4V ELI для медицинского применения имеет низкие значения примесей, в частности, кислорода, поэтому обладает достаточно высокими пластическими характеристиками [3]. Известно, что долговечность материала складывается из времени до зарождения первых трещин, которое определяется статической прочностью, и временем распространения трещины, которое зависит от его пластичности. Возможно, близкие значения долговечности УМЗ титана и обычного сплава Ti-6Al-4V ELI можно объяснить значительным увеличением периода до зарождения трещин в более высокопрочном УМЗ титане при одновременном сокращении времени ее распространения из-за его пониженной пластичности в условиях затрудненного движения дислокаций в очень маленьких зернах. Данное обстоятельство, очевидно, повлияло также на предел выносливости УМЗ титана на образцах с надрезом, который был чуть ниже, чем на сплаве. Однако очень важно, что коэффициенты усталостной чувствительности  $q$  исследуемых материалов близки и составляют для УМЗ Ti Grade 4 – 0,5, для крупнозернистого Ti Grade 4 – 0,3, а для Ti-6Al-4V ELI – 0,4. Кроме того, в [3] показано, что значения коэффициента  $q$  для технического сплава Ti-6Al-4V в отожженном и термоупрочненном состоянии находятся в интервале от 0,53 до 1,0, таким образом, даже по сравнению с термоупрочненным сплавом Ti-6Al-4V (1150 МПа), УМЗ Ti Grade 4 с более вы-

сокой прочностью (до 1250 МПа) имеет более низкую усталостную чувствительность к надрезу.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Малоцикловой усталостью называются разрушения при повторных упругопластических деформациях. Обычно разрушения малоцикловой усталости происходят при числе циклов повторения нагрузки  $N < 10^5$ . Малоцикловая усталость имеет много общего с обычной усталостью, но отличается от нее наличием макропластических деформаций в зоне излома. Как и при обычной, многоцикловой усталости, разрушение начинается в местах концентрации напряжений в результате развития первоначально образовавшейся трещины.

Механизм малоциклового разрушения значительно отличается от механизма усталостного разрушения, так как пластические деформации возникают в значительно больших объемах материала. В частности, различие сказывается в том, что сопротивление материалов малоцикловой усталости существенно зависит от их пластичности, тогда как подобная зависимость для обычной усталости проявляется слабо.

В машиностроении малоцикловая усталость часто определяет долговечность изделий в связи с повторением циклов «запуск-работа-останов», т. е. в моменты, когда нагрузка сильно возрастает. Характерный пример – диски авиационных двигателей, испытывающих  $(5-10) \cdot 10^3$  выходов на максимальные обороты, при которых напряжения приближаются к пределу текучести материала. При этом в случае малоцикловой усталости разрушения не имеют следов пластической деформации в очагах зарождения трещин. Закономерности малоциклового разрушения занимают «промежуточное положение» между статической и усталостной прочностью. В частности, локальный характер усталостной прочности, зависимость от состояния поверхности проявляются при малоцикловой усталости в меньшей степени. Сравнительные испытания болтов М6 из сплава ВТ-6 [5] и наноструктурного чистого титана проводили на специальной установке, принципиальная схема которой показана на рис. 3.1, а. На рис. 3.1, б показана гирлянда образцов в процессе испытаний.

Базовое число циклов принималось равным  $N_0 = 5 \cdot 10^4$  циклов, частота нагружения составляла 20-25 циклов в минуту, температура испытаний 20 °С. Болты испытывали при нагрузках

$F_{\max} = 0,7F_{pp}, 0,6F_{pp}$  и  $0,55F_{pp}$ , где  $F_{pp}$  – расчетно-разрушающая нагрузка для болтов,  $F_{\min} = 0 \div 0,1F_{pp}$ . Условия малоцикловых испытаний показаны на рис. 3.2.

Исследуемые резьбовые образцы были изготовлены методом накатывания. Накатывание резьбы на образцах из титанового сплава ВТ-6 и наноструктурного чистого титана проводилось при одинаковых режимах накатывания.

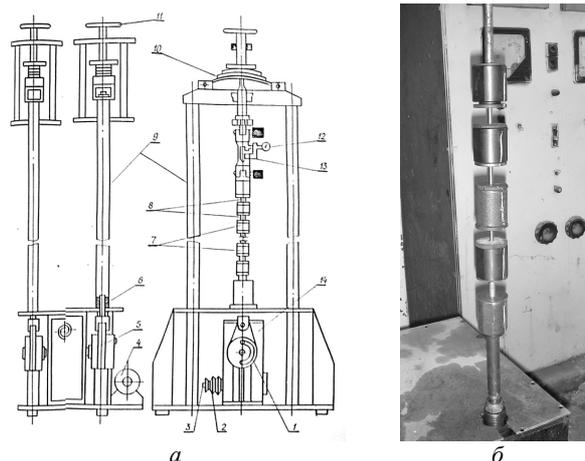


Рис. 3.1. Установка для испытаний на малоцикловую усталость

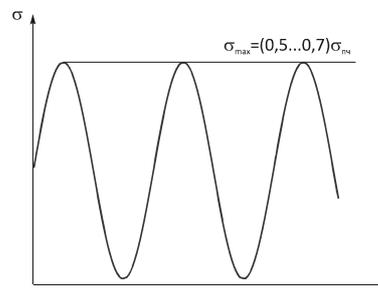


Рис. 3.2. Условия малоцикловых испытаний – 20–25 циклов в минуту

На рис. 3.3 представлены кривые малоцикловой усталости резьбовых соединений. На рис. 3.4, а, показан вид образцов изделия до испытаний, а на рис. 3.4, б – после испытаний.

Выявлено, что долговечность при малоцикловом нагружении резьбовых соединений из объемных наноматериалов (чистый титан) на 20% ниже долговечности соединений из титанового сплава. Однако чистый титан существенно дешевле титанового сплава.

Разрушение образцов из наноструктурного чистого титана и титанового сплава ВТ-6, при испытаниях на малоцикловую усталость, происходило по резьбе, непосредственно под первым витком гайки, в наиболее нагруженном сечении детали. На рис. 3.4, б гайка была отвернута для демонстрации зоны разрушения детали.

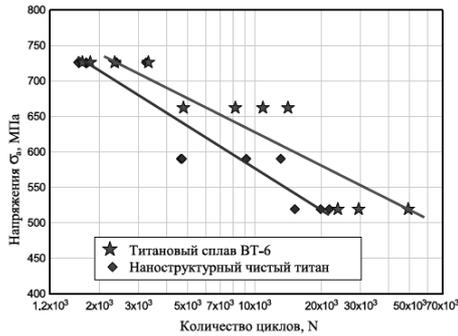


Рис. 3.3. Результаты испытаний по долговечности резьбовых соединений

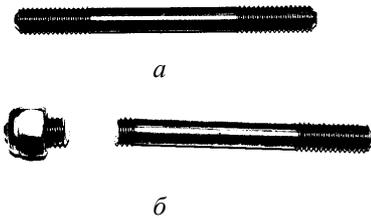


Рис. 3.4. Вид образцов изделия: а – до испытаний; б – после испытаний

## ВЫВОДЫ

1. Полученные поля распределения накопленной пластической деформации в детали из объемного наноструктурного материала, после четырех проходов РКУП и накатки резьбы плашкой, свидетельствуют об увеличении в среднем на 10,5%, по сравнению с четвертым проходом РКУП, уровня интенсивности деформаций в заготовке.

2. Определены факторы усталостной чувствительности к надрезу УМЗ титана. Установлено, что с увеличением теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_t$  от 3,3 до 4,4 повышается эффективный коэффициент концентрации напряжений  $K_\sigma$  от 1,9 до 2,77 и коэффициент чувствительности к надрезу  $q$  от 0,39 до 0,53. При этом обнаружено, что УМЗ титан имеет повышенную чувствительность к надрезу по сравнению с обычным крупнозернистым аналогом ( $q = 0,39$  и  $0,24$  соответственно), однако относительно сплава ВТ6 ( $q=0,52$ ) он является и более прочным и более долговечным в случае надреза.

3. Теоретически получены поля напряжений и пластических деформаций в резьбовых деталях, изготовленных из наноструктурного титана, и установлено, что долговечность резьбовых деталей из чистого наноструктурного титана находится незначительно ниже малоциклового прочностного уровня резьбовых деталей из сплава ВТ-6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
2. Воробьев, А.З. Сопротивление усталости элементов конструкций / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебнев [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.
3. Жернаков, В.С. Отчет о научно-исследовательской работе по ГНТП РБ «Критические технологии Республики Башкортостан: физико-математические принципы и технические решения» / В. С. Жернаков, Р. З. Валиев [и др.]. Уфа, АНРБ, 2008.
4. Жернаков, В.С. Влияние масштабного фактора на получение наноструктурной меди и титана при РКУП образцов круглого поперечного сечения / В.С. Жернаков, А. Н. Ермоленко. Проблемы машиноведения, технологий в машиностроительном комплексе РБ: сб. науч. тр. Уфа: Гилем, 2006. С. 67–75.
5. Жернаков, В.С. Ресурс и надежность резьбовых соединений / В. С. Жернаков, Е. Н. Петров, Р. Г. Якупов. М.: Машиностроение, 2003. 292 с.

## ОБ АВТОРАХ



**Жернаков Владимир Сергеевич**, засл. деятель науки РФ, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.



**Семенова Ирина Петровна**, ст. науч. сотр. Ин-та физики перспективн. материалов. Дипл. инж.-металлург (УПИ-УГТУ, 1981). Канд. техн. наук по металл. и термообр. металлов (УПИ-УГТУ, 1999). Иссл. в обл. наноструктурн. титан. сплавов, получ. с использованием интенсивн. пластич. деформации.



**Ермоленко Анатолий Николаевич**, асп. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. НДС наноструктурн. матер., получ. с использованием интенсивн. пластич. деформации.