

УДК 621.452.3.002.3

**Павленко В. Н.  
Волков И. В.****ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ  
НА ИЗМЕНЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Предел выносливости является важной характеристикой материала при прогнозировании долговечности детали, подвергающейся периодическому нагружению. Одним из факторов, влияющим на сопротивление усталости деталей машин является деформационное упрочнение. Основной причиной упрочнения является повышенная плотность дислокаций, скапливающихся вблизи сдвигов и последующая их остановка перед различного рода препятствиями, образующимися в процессе деформирования [1].

В работе [2] отмечается, что поверхностное пластическое деформирование снижает неоднородность протекания деформаций по микрообъемам и создает благоприятные условия для более равномерного протекания пластических сдвигов, что увеличивает ресурс пластичности материалов.

Анализ литературных источников указывает на многообразие факторов, оказывающих неблагоприятное влияние на выносливость лопаток компрессора.

Основные факторы, способствующие процессу зарождения и развития усталостных трещин на переломе лопаток компрессора (особенно на кромках), возникают на финишных этапах изготовления и в эксплуатационных условиях.

Специфическое влияние поверхности на сопротивление усталости заключается не только в наличии шероховатостей и технологических концентраторов напряжений, но и в том, что пластическое деформирование металла начинается на поверхности раньше, чем в сердцевине.

Проведенные к настоящему времени исследования не дают достаточно точных сведений о физических закономерностях поведения поверхностных слоев при различных способах макро и микродеформирования.

Источниками зарождения усталостных трещин, приводящих к разрушению рабочих лопаток компрессора, являются дефекты структуры материала, поверхностные дефекты, образованные в процессе изготовления и эксплуатации [3]. Установлено, что с увеличением размеров глобул  $\alpha$  из титанового сплава ВТЗ-1 предел выносливости уменьшается в два раза [4].

Степень влияния поверхностных дефектов определяется уровнем концентрации напряжений, которую они вызывают, уровнем и знаком остаточных напряжений. Обращает на себя внимание противоречивость результатов исследований характеристик многоциклового усталости лопаток в процессе эксплуатации. Усталостное разрушение в основном начинается у некоторой неоднородности, вызывающей концентрацию напряжений. Предел текучести в наибольшей мере характеризует сопротивление усталостному разрушению. Однако пластическая деформация, связанная с процессом усталости, часто бывает локализованной. Для многих материалов предел выносливости составляет часть условного предела текучести.

Установлено, что после ультразвукового упрочнения шариками рассеяние долговечности лопаток компрессора уменьшается на 19,5 % по сравнению с серийной обработкой (виброполированием) [5].

До настоящего времени нет однозначного ответа на вопрос о взаимосвязи наклепа с несущей способностью лопаток газотурбинных двигателей.

Все указанное выше подчеркивает актуальность дальнейших исследований влияния технологических факторов на величину сопротивления усталости титановых сплавов, как основного материала для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей.

Целью работы является установление закономерностей влияния поверхностного деформационного упрочнения на изменение предела выносливости титановых сплавов.

Для исследования использовались цилиндрические образцы корсетной формы диаметром рабочей части 8,5 мм, из сплава ВТ8 изготовленные из прутка и крупногабаритной поковки. Заготовки образцов подвергались термообработке по трем режимам, что обеспечивало трем партиям образцов различную структуру и механические свойства. Режимы термообработки и механические свойства образцов приведены в табл. 1. Половина образцов каждой партии подвергалась виброупрочнению.

Таблица 1

Режимы термообработки и механические свойства образцов

Номер партии	Режим термообработки	Механические свойства			
		Образцы из прутка		Образцы из поковки	
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа
I	920 °С – 1 час → 650 °С – 2 часа → воздух	999	967	986	894
II	960 °С – 1 час → воздух + 870 °С – 1 час → 650 °С	1019	942	1002	914
III	1050 °С – 1 час → воздух + 870 °С – 1 час → 650 °С – 2 часа → воздух	1013	926	1041	952

Из табл. 1 следует, что пределы прочности и текучести образцов всех типов были на одном уровне, однако характеристики пластичности снижались при переходе от равноосной структуры к пластинчатой. Также отмечается пониженная пластичность образцов, вырезанных из поковок.

Испытания на усталость проводились при изгибе с вращением. На начальном этапе исследования испытания каждого варианта неупрочненных образцов, изготовленных из прутка, были проведены на нескольких уровнях напряжений. По результатам этих испытаний построены кривые усталости. Пределы выносливости определяли на базе  $10^7$  циклов [6].

В дальнейшем с целью более обоснованного определения значений пределов выносливости испытания образцов других вариантов проводились с привлечением метода ступенчатого изменения нагрузки. Часть образцов каждого варианта испытывали по ступенчатой схеме, другая часть образцов испытывалась на верхних уровнях напряжений. Для каждого варианта образцов по результатам испытаний с учетом вычисленного значения предела выносливости строилась кривая усталости, по которой определялся окончательный предел выносливости.

Метод ступенчатого изменения нагрузки предусматривает испытание серии образцов на нескольких уровнях напряжений. Первый образец испытывался при напряжении, равном ожидаемому пределу выносливости. Если первый образец не разрушался при достижении базового числа циклов, то второй образец испытывался при более высоком уровне напряжения, а если он разрушался, то второй образец испытывался при более низком уровне напряжения. Уровень напряжения для испытания третьего образца выбирают по результатам испытания второго образца. Таким образом, уровень напряжений для каждого последующего образца повышается по сравнению с предыдущим, если предыдущий образец не разрушился и понижается, если он разрушился.

Перепад между уровнями напряжений выбирался постоянным, не превышающим одного-двух значений предела выносливости. При исследовании были приняты ступени нагружения  $d = 50$  МПа – для неупрочненных и  $d = 25$  МПа – для упрочненных образцов.

Предел выносливости определялся по формуле:

$$\sigma_{-F} = \sigma_0 + d[\sum i \cdot n / N \pm 0,5]$$

где  $N = \sum n$  – наименьшая сумма разрушенных или неразрушенных образцов;

$\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i$  – уровни напряжений при испытаниях

$i$  – порядковый номер уровня напряжений.

Знак плюс в квадратных скобках приведенной формулы ставится в том случае, если общее число разрушений больше числа неразрушений, в противном случае ставится знак минус.

На рис.1 и 2 сопоставлены кривые усталости образцов различных вариантов (прутка и поковки, шлифованных и виброупрочненных).

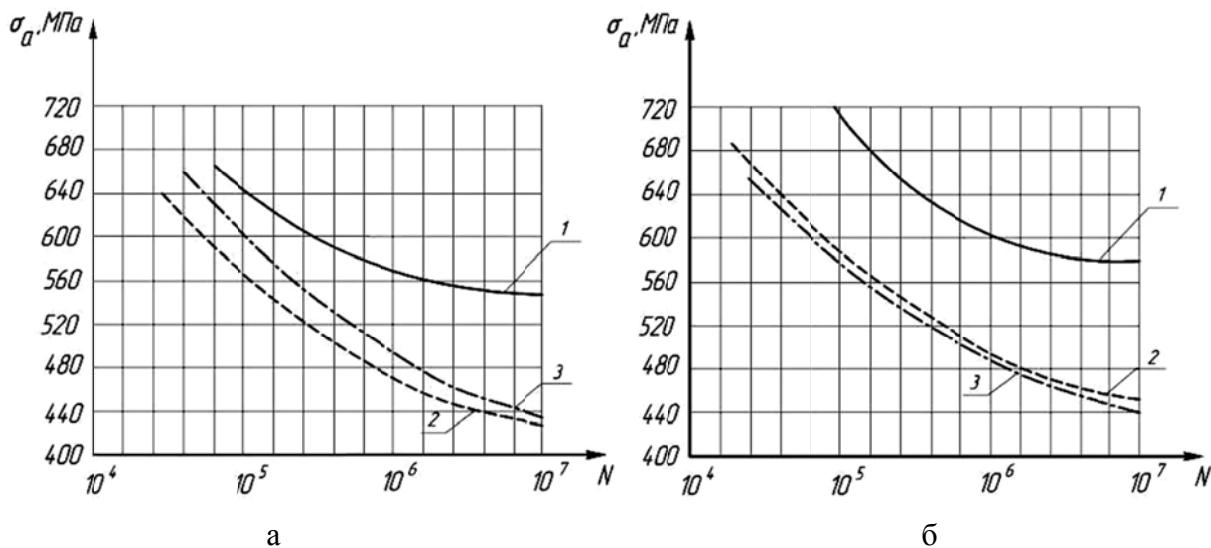


Рис. 1. Кривые усталости образцов из сплава ВТ8, изготовленных из прутка:  
а – без упрочнения; б – упрочненные; 1 – партия I; 2 – партия II; 3 – партия III

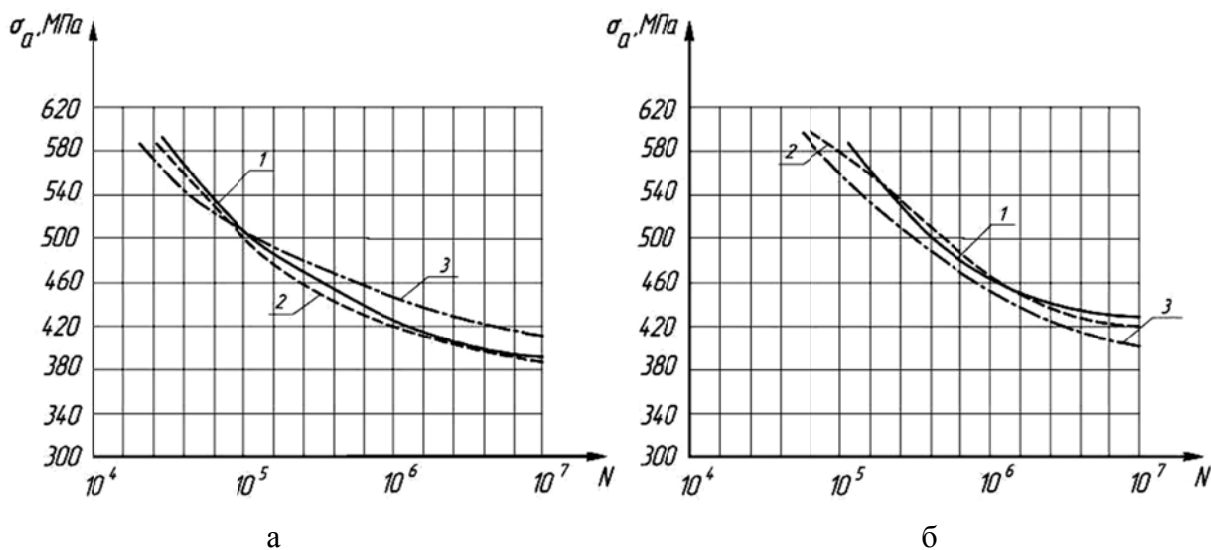


Рис. 2. Кривые усталости образцов из сплава ВТ8, изготовленных из поковки:  
а – без упрочнения; б – упрочненные; 1 – партия I; 2 – партия II; 3 – партия III

Из приведенных данных следует, что абсолютные значения пределов выносливости образцов, изготовленных из поковки, оказались ниже, чем образцов, изготовленных из прутка. Максимальное значение предела выносливости  $\sigma_{-1} = 571$  МПа имели упрочненные образцы партии I, изготовленные из прутка. Максимальное значение предела выносливости для образцов из поковки составило  $\sigma_{-1} = 431$  МПа.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов упрочнения, полученных при испытании партий образцов, изготовленных из прутка и поковки, подвергнутых виброупрочнению. За «1» принимались значения пределов выносливости соответствующих не упрочненных образцов, принадлежащих к той же партии.

Таблица 2

## Значения коэффициентов упрочнения

Прутки			Поковки		
Партия I	Партия II	Партия III	Партия I	Партия II	Партия III
1,04	1,06	1	1,09	1,1	1

Полученный эффект упрочнения как при испытании образцов из прутка, так и из поковки оказался весьма незначительным. Он проявляется только при равноосной и смешанной структуре материала. При испытании образцов, имеющих пластинчатую структуру, упрочнения не обнаружено.

В процессе исследования так же проанализировано изменение предела выносливости образцов в связи с вибронаклепом.

Для оценки значимости изменения предела выносливости образцов в связи с вибронаклепом был проведен статистический анализ полученных экспериментальных данных:

$$\sigma_{-1}^{6,H} = \sigma_{-1} + Z_p S_{\sigma_{-1}} \frac{G}{\sqrt{N}}.$$

Доверительный интервал пределов выносливости определяется соотношением:

$$S_{\sigma_{-1}} = 1,62 \left[ \left( N \sum_{i=0}^k i^2 n_i - \left( \sum_{i=0}^k i n_i \right)^2 / N^2 \right) - 0,29 \right],$$

где  $S_{\sigma_{-1}}$  – среднеквадратичное отклонение предела выносливости;

$G$  – функция, зависящая от соотношения  $d/S_{\sigma_{-1}}$ .

Для доверительной вероятности 0,9 значение  $Z_p = \pm 1,645$ .

Результаты статистического анализа экспериментальных данных, полученных при испытании образцов, вырезанных из поковки, приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Результаты статистического анализа экспериментальных данных, полученных при испытании образцов из поковок

Варианты образцов	Партия I		Партия II		Партия III	
	Неупр.	Упроч.	Неупр.	Упроч.	Неупр.	Упроч.
$\sigma_{-1}$ , МПа	390	425	380	418	401	405
$S_{\sigma_{-1}}$ , МПа	51,65	35,95	38,15	26,67	17,09	49,45
N образцов	6	6	4	4	5	4
$d/S_{\sigma_{-1}}$	0,968	0,70	1,31	0,937	2,925	0,505
$G$ , МПа	0,995	0,96	1,045	0,99	1,23	0,938
$\sigma_{-1}^B$ , МПа	425	448,4	412,8	440,5	416,5	443
$\sigma_{-1}^H$ , МПа	355,5	401,6	347,2	397	385,5	366,8

Анализ приведенных данных показывает, что среднее значение предела выносливости неупрочненных образцов партии I  $\sigma_{-1} = 390$  МПа не находится в доверительном интервале пределов выносливости упрочненных образцов  $\sigma_{-1}^H = 401,6$  МПа;  $\sigma_{-1}^B = 448,4$  МПа.

Среднее значение предела выносливости упрочненных образцов  $\sigma_{-1} = 425$  МПа также не находится в доверительном интервале пределов выносливости неупрочненных образцов  $\sigma_{-1}^H = 355,5$  МПа;  $\sigma_{-1}^B = 425$  МПа.

Следовательно, имеет место значительное изменение пределов выносливости образцов партии I, связанное с виброупрочнением их поверхности.

Аналогичные соотношения имеют место для образцов партии II. Среднее значение предела выносливости неупрочненных образцов партии II  $\sigma_{-1} = 380$  МПа оказывается меньше нижнего предела выносливости упрочненных образцов  $\sigma_{-1} = 397$  МПа. При этом среднее значение предела выносливости упрочненных образцов  $\sigma_{-1} = 418$  МПа превышает верхнее значение предела выносливости неупрочненных образцов  $\sigma_{-1}^B = 425$  МПа.

Таким образом, наблюдается значительное изменение пределов выносливости, вызванное наклепом образцов партии II.

Для образцов партии III среднее значение предела выносливости неупрочненных образцов попадает в доверительный интервал пределов выносливости упрочненных образцов, а среднее значение  $\sigma_{-1}$  для упрочненных образцов попадает в доверительный интервал  $\sigma_{-1}$  неупрочненных образцов.

Таким образом, наклеп партии III с пластинчатой крупнозернистой структурой не привел к ощутимому изменению предела выносливости на базе испытаний  $10^7$  циклов.

### ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований влияния поверхностного деформационного упрочнения на изменение предела выносливости титановых сплавов установлено, что абсолютные значения пределов выносливости образцов, изготовленных из поковки, оказались ниже, чем образцов, изготовленных из прутка.

Эффективность упрочнения вибронаклепом образцов из титанового сплава ВТ 8, вырезанных из прутка и поковки, на базе  $10^7$  циклов не превышает 10 % и зависит от структуры материала. Наибольший эффект упрочнения достигается в случае мелкозернистой структуры.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Г. В. *Физико-химическая механика конструкционных материалов. Т. 1* / Г. В. Карпенко. – К. : Наук. думка, 1985. – 226 с.
2. Папиев Д. Д. *Исследование тонкой кристаллической структуры при упрочнении обкаткой титановых сплавов* / Д. Д. Папиев, Ю. Г. Голубев, Л. А. Азизбекян // *Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов : сб. науч. тр. / М-во высш. и среднего спец. образования РСФСР, Куйбышев. политехн. ун-т им. В. В. Куйбышева.* – Куйбышев, 1975. – С. 11–13.
3. Троценко В. Т. *Влияние технологических и эксплуатационных факторов на сопротивление усталости и живучести рабочих лопаток ГТД* / В. Т. Троценко, Б. А. Грязнов, Ю. С. Налимов // *Вибрации в технике и технологиях.* – 2001. – № 5 (21). – С. 2–6.
4. Жеманюк П. Д. *Влияние технологических особенностей формирования поверхностного слоя на сопротивление усталости лопаток компрессора ГТД* / П. Д. Жеманюк, О. В. Рубель, Г. В. Пухальская // *Придніпр. наук. вісн. : техн. науки.* – Д., 1998. – Вып. 115 (182). – С. 1–6.
5. *Повышение выносливости лопаток компрессора* / В. А. Богуслаев, О. В. Рубель, Н. В. Сахнюк [и др.] // *Технологические системы.* – 2002. – № 3 (14). – С. 65–70.
6. *Эффективность поверхностного упрочнения титановых сплавов* / В. В. Ткаченко, В. В. Попов, В. А. Матюхин, В. Н. Куципак // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».* – Х., 2000. – Вып. 21 (4). – С. 110–124.

Павленко В. Н. – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАИ»;

Волков И. В. – науч. сотрудник НАУ «ХАИ».

НАУ «ХАИ» – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.

E-mail: v.pavlenko@khai.edu

Статья поступила в редакцию 23.01.2012 г.