

УДК 621.452.3.002.3:669.295

В. С. Кривцов, д-р. техн. наук
В. Н. Павленко, канд. техн. наук
И. В. Волков

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
(г. Харьков, e-mail: v.pavlenko@khai.edu)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЯДА ФАКТОРОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Проведены исследования влияния технологических деформаций, размеров деталей и срока эксплуатации на сопротивление усталости титановых сплавов. Установлено влияние концентраторов напряжений на сопротивление усталости деталей из титановых сплавов.

Проведено дослідження впливу технологічних деформацій, розмірів деталей і терміну експлуатації на опір втоми титанових сплавів. Установлено вплив концентраторів напружень на опір втоми деталей з титанових сплавів.

Введение

Многочисленные исследования показали, что разрушение лопаток носит усталостный характер, причем поскольку в одном двигателе работает до трех с половиной тысяч лопаток, то в силу его конструктивных особенностей поломка даже одной из них приводит, как правило, к выходу из строя всего двигателя. Поскольку усталостная прочность зависит от прочности и пластичности материала, то оценка деформируемости металлов является особенно актуальной.

Источниками зарождения усталостных трещин, приводящих к разрушению рабочих лопаток компрессора, являются дефекты структуры материала, поверхностные дефекты, образованные в процессе изготовления и эксплуатации [1]. Установлено, что с увеличением размеров глобулей из титанового сплава ВТ3-1 предел выносливости уменьшается в два раза [2].

В процессе изготовления многие ответственные детали из титановых сплавов подвергаются частично или целиком пластическому деформированию, что в свою очередь приводит к изменению усталостных свойств материала [3].

Целью данной статьи является изучение влияния технологических деформаций, размеров деталей и срока эксплуатации, а также воздействие концентраторов напряжений на сопротивление усталости титановых сплавов.

Экспериментальное изучение влияния предварительных пластических деформаций на сопротивление усталости проводилось на титановых сплавах марки ВТ6.

Согласно методике испытаний для исследования использовались образцы с изменяющимся вдоль оси диаметром рабочей части. Минимальный диаметр составлял 10 мм.

На первом этапе изучался интервал малых деформаций растяжения, переходящих из упругих в пластические. Для этого диапазон поперечных деформаций задавался от 0 до 0,5%. Анализ усталостных испытаний деформированных образцов показал, что в интервале остаточных деформаций от 0 до 0,5% значение предела выносливости остается неизменным. Это говорит о том, что минимальные пластические деформации не оказывают никакого влияния на сопротивление усталости сплава ВТ6. Среднее значение предела выносливости, определенного по методу «вверх-вниз», в этом случае составляет 390 МПа.

Для определения критического значения деформации, приводящей к наибольшему снижению сопротивления усталости сплава, диапазон деформаций был расширен от 0 до

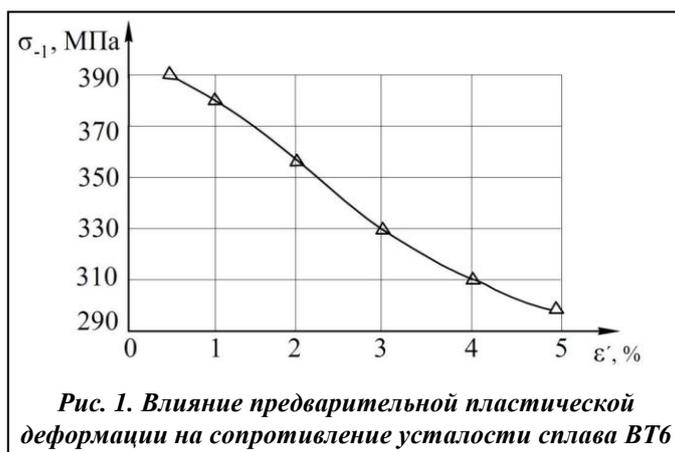


Рис. 1. Влияние предварительной пластической деформации на сопротивление усталости сплава ВТ6

лическом нагружении усталостное разрушение образцов всех серий происходило в сечении с минимальным диаметром. Это позволяет заключить, что во всей области остаточных деформаций от 0 до 5% по мере увеличения деформации происходит монотонное уменьшение значения предела выносливости сплава. Критическое значение предварительной деформации, наиболее сильно снижающей предел выносливости, составляет 5%.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, зависимость усталостной прочности сплава ВТ6 от степени предварительной деформации характеризуется типичным для $\alpha + \beta$ -титановых сплавов монотонным снижением предела выносливости по мере роста величины деформации. Данный факт еще раз подтверждает гипотезу, согласно которой характер влияния предварительного деформирования на сопротивление усталости титановых сплавов определяется количеством β -фазы.

Разработанная методика, обеспечивающая автоматическое выявление приводящей к наибольшему усталостному разупрочнению степени предварительной деформации, позволяет утверждать, что резкие провалы значений предела выносливости, характерные для ряда титановых сплавов, у сплава ВТ6 отсутствуют.

Вышеизложенное дает возможность рекомендовать применение упрочняющей обработки методами поверхностного пластического деформирования деталей из сплава ВТ6 для повышения долговечности изделий.

Важно отметить следующее: испытания $\alpha + \beta$ -титановых сплавов ВТ8 и ВТ6 на многоцикловую усталость показали, что предел выносливости недеформированных и деформированных растяжением или сжатием образцов, определенный на базе 10^7 циклов нагружения, не снижается при увеличении базы до 10^8 циклов; таким образом, для изучения изменения сопротивления усталости материала под влиянием предварительной деформации достаточно базы испытаний 10^7 циклов. В то же время результаты этих испытаний позволяют прогнозировать эффект снижения усталостной прочности подвергнутых поверхностному деформированию изделий, проявляющийся лишь при повышении базы испытаний до 10^8 и даже 10^9 циклов нагружений.

Оценка влияния размеров деталей и срока эксплуатации на сопротивление усталости проводилась на образцах, изготовленных из сплава ВТ6.

Основные механические характеристики материалов приведены в табл. 1. Характеристики сопротивления усталости при стационарном нагружении представлены в табл. 2.

Таблица 1. Механические характеристики материалов

Тип сплава	Вид заготовки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
ВТ6	Прокат, пруток диаметром 60мм	830	750	17,0	43,0

Таблица 2. Характеристики сопротивления усталости

Материал	Диаметр образцов, мм	Математическое ожидание σ_{-1} , МПа	Среднее квадратичное отклонение $s_{\sigma_{-1}}$, МПа
ВТ6	10	390	26
	20	380	29
	30	364	12

Известно, что на сопротивление усталости существенное влияние оказывает масштабный фактор (абсолютные размеры поперечного сечения образца). Для оценки влияния масштабного фактора вводится коэффициент

$$\varepsilon_{\sigma} = (\sigma_{-1})_d / (\sigma_{-1})_{d_0},$$

где $(\sigma_{-1})_d$ – предел выносливости образца диаметром d , $(\sigma_{-1})_{d_0}$ – предел выносливости образца малого диаметра d_0 (обычно $d_0 = 7 \dots 10$ мм).

В основе определения ε_{σ} лежат кривые усталости, построенные по результатам испытаний ограниченного числа образцов. Они характеризуют с определенной точностью свойства материалов, не отражая степени рассеяния параметров прочности при переменных нагрузках.

В работе исследовано влияние масштабного фактора на сопротивление усталости в статистическом аспекте.

Образцы из сплава ВТ6 диаметром 30 мм изготавливались из прокатного прутка диаметром 60 мм, диаметром 20 мм – из прутка диаметром 35 мм. Серия образцов диаметром 10 мм вытачивалась из двадцатимиллиметровых образцов после их испытаний.

Математическое ожидание пределов выносливости определялось методом «вверх-вниз». Все результаты испытаний обрабатывались по методике, описанной выше.

Испытания образцов диаметром 10 мм показали, что по долговечности наблюдается большой разброс экспериментальных данных. Несмотря на это, сделана попытка анализа распределения пределов выносливости сплава ВТ6 в зависимости от диаметра образца (рис. 2) в статистическом аспекте. Из рис. 2 следует, что положение статистической теории прочности «наиболее слабого звена» хорошо согласуется с результатами испытаний. Действительно, рассеяние пределов выносливости образцов большего диаметра меньше, чем рассеяние пределов выносливости образцов меньшего диаметра.

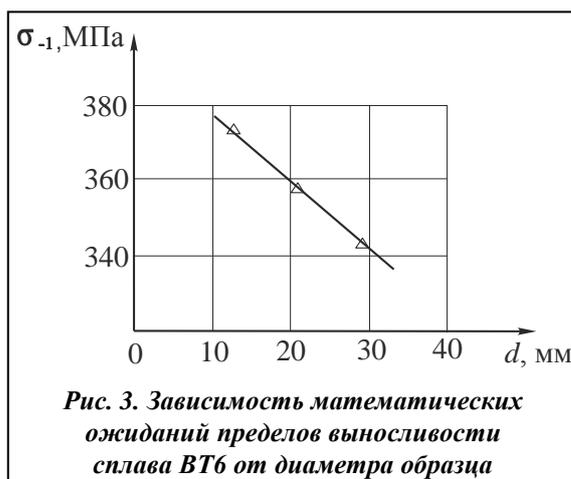
Масштабный фактор проявляется отчетливее при больших вероятностях разрушения и незначителен при малых. Наклон прямой распределения пределов выносливости для образцов диаметром 10 мм определялся по нескольким точкам, вычисленным для области вероятности, близкой к 50% (от 30 до 70%), где ошибка ожидается наименьшей.

Математическое ожидание, как более устойчивая характеристика, изменяется меньше и поэтому может быть использована для оценки масштабного фактора. На рис. 3 представлены функциональные зависимости математических ожиданий пределов выносливости от диаметров образцов для сплава ВТ6. С увеличением диаметра предел выносливости понижается. Характер зависимости затухающий.

Чтобы выявить влияние срока эксплуатации на предел выносливости деталей из титанового сплава, использовалась вероятностная диаграмма



Рис. 2. Распределение пределов выносливости сплава ВТ6 в зависимости от диаметра образца:
1 – $d = 10$ мм; 2 – $d = 20$ мм; 3 – $d = 30$ мм



сплава ВТ6.

На четырех уровнях напряжений, равных 550, 500, 440, 400 МПа, испытывалось соответственно 10, 40, 40 и 40 образцов при базе 10^7 циклов. По двадцати образцам определялся затем предел выносливости методом «вверх-вниз» на базе 10^8 циклов.

На рис. 4 приведена диаграмма усталости сплава ВТ6. Распределение пределов выносливости для различных баз испытаний иллюстрируется рис. 5.

Результаты свидетельствуют о том, что после базы 10^7 предел выносливости гладких неупрочненных образцов практически не меняется. Этот вывод подтверждается и тем, что

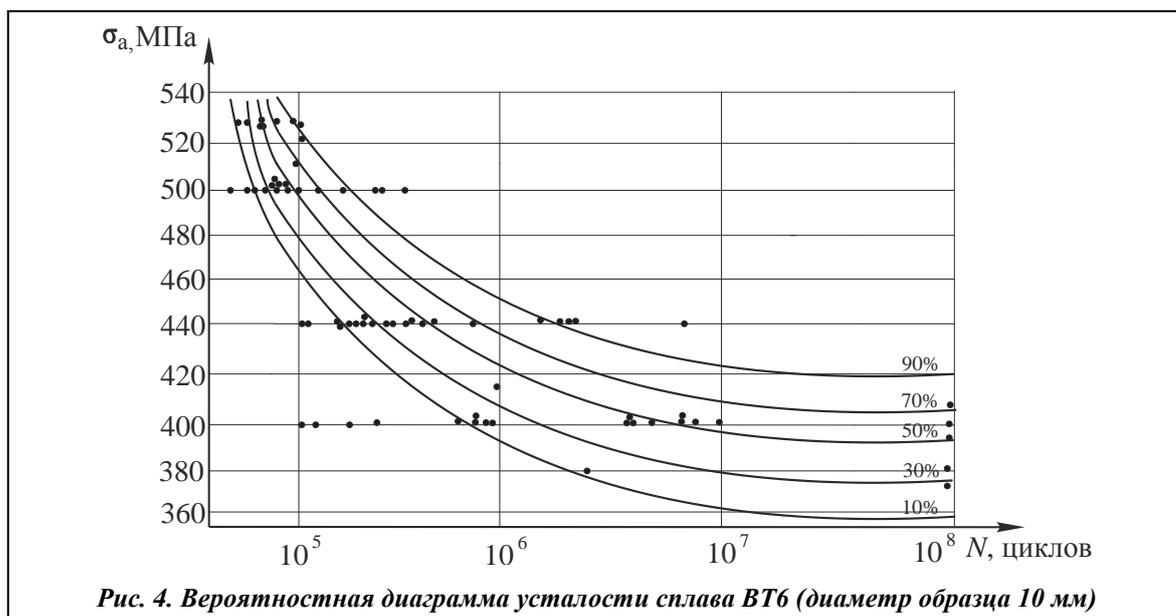
в интервале циклов $10^7 \dots 10^8$ не разрушился ни один образец. Экстраполяция на базу 10^9 циклов не дает заметного снижения предела выносливости.

Определение воздействия концентрации напряжений на сопротивление усталости деталей проводилось путем оценки влияния надреза на усталостную прочность образцов из титанового сплава ВТ6.

Концентрация напряжений в деталях сложной формы характеризуется теоретическим коэффициентом концентрации напряжений α_T , который показывает, во сколько раз максимальное напряжение больше номинального при условии чисто упругих деформаций. Однако снижение выносливости вследствие концентрации напряжений не соответствует теоретическому коэффициенту концентрации напряжений, подсчитанному в предположении упругой работы материала. Поэтому вводится понятие эффективного коэффициента напряжений K_σ , который определяется как отношение предела выносливости образца без концентрации к пределу выносливости образца с концентрацией напряжений. Соотношение между K_σ и α_T определяется коэффициентом чувствительности к надрезу

$$q = (K_\sigma - 1) / (\alpha_T - 1).$$

Исследование влияния концентрации напряжений в сплаве ВТ6 проводили на надрезанных образцах диаметром 20 мм. Образцы имели теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_T = 3,6$. Надрезы выполнялись с помощью заточенного инструмента с ми-



нимальными подачами при обильном охлаждении образцов эмульсией. Точность основных геометрических параметров канавки проверяли отдельно у каждого образца.

Результаты сравнительных испытаний на воздухе гладких и надрезанных образцов (в количестве по 15 штук) методом «вверх-вниз» представлены в табл. 3, где указаны значения средних пределов выносливости, эффективных коэффициентов концентрации напряжений K_σ и коэффициентов чувствительности к надрезу q .

Проведенные эксперименты позволяют заключить, что исследуемый сплав обладает высокой чувствительностью к концентрации напряжений.

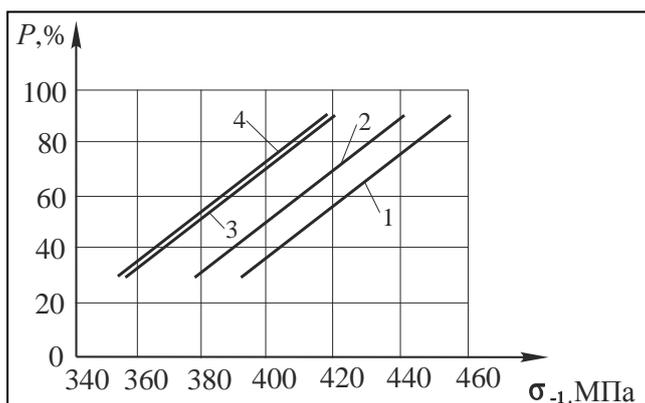


Рис. 5. Распределение пределов выносливости сплава ВТ6 для различных баз испытаний (диаметр 10 мм):

1 – $5 \cdot 10^5$ циклов, 2 – 10^6 циклов,
3 – 10^7 циклов, 4 – 10^8 циклов

Таблица 3. Результаты сравнительных испытаний гладких и надрезанных образцов

Сплав	Предел выносливости, МПа		K_σ	q
	гладкие	надрезанные		
ВТ6	384	150	2,56	0,60

Выводы

В интервале остаточных деформаций от 0 до 0,5% значение предела выносливости остается неизменным. Увеличение технологических остаточных деформаций от 0 до 5% приводит к монотонному уменьшению значения предела выносливости титанового сплава.

Рассеяние пределов выносливости образцов большего диаметра меньше, чем рассеяние пределов выносливости образцов меньшего диаметра.

После базы испытаний 10^7 циклов предел выносливости гладких неупрочненных образцов практически не меняется.

Титановый сплав ВТ 6 обладает высокой чувствительностью к концентрации напряжений.

Литература

1. 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.
2. 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. – 1998. – Вип. 115 (182). – С. 1–6.
3. Гладковский В. А. Комплексное исследование закономерностей зарождения и развития усталостных повреждений в элементах деталей, упрочненных поверхностным деформированием / В. А. Гладковский, Н. Н. Вассерман, В. И. Калугин // Надежность и долговечность машин и приборов : Тез. докл. II Всесоюз. науч. конф. – Куйбышев, 1984. – С. 45–46.

Поступила в редакцию
08.12.11