

$$\omega_{pk(1,2)} = \left\langle \frac{1}{2} \left[\frac{c_k + c_{(k+1)}}{m_{(k+1)}} + \frac{c_k}{m_k} - \frac{b_k b_{(k+1)}}{m_k m_{(k+1)}} \right] \pm \left\{ \frac{1}{4} \left[\frac{c_k c_{(k+1)}}{m_k m_{(k+1)}} + \frac{c_k}{m_k} - \frac{b_k b_{(k+1)}}{m_k m_{(k+1)}} \right]^2 - \frac{c_k c_{(k+1)}}{m_k m_{(k+1)}} \right\}^{\frac{1}{2}} \right\rangle^{\frac{1}{2}}. \quad (27)$$

Заметим, что выражение (24) и (20) математически аналогичны. Для перемещения x_n , кроме (27), имеются еще резонансные частоты, вид которых был определен для диссипативной КС с одной степенью свободы выражением (7). В нашем случае

$$\omega_{pn(1,2)} = \left(\frac{c_n}{m_n} \pm \frac{b_n}{2m_n^2} \sqrt{b_n^2 - 4m_n c_n} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (28)$$

Особенности анализа (28) приведены при анализе (7). Из уравнения (26) имеем еще одну резонансную частоту

$$\omega_{pk(3)} = \left[\frac{b_{(k+1)}c_k + b_k c_{(k+1)}}{b_k m_k + b_k m_{(k+1)} + b_{(k+1)} m_k} \right]^{\frac{1}{2}},$$

которая является функцией от параметров $b_k, b_{(k+1)}, c_k, c_{(k+1)}, m_k, m_{(k+1)}$.

Заключение

Таким образом, располагая параметрами КС или задаваясь ими и предусматривая связь в виде, изображенном на рис. 3, строится структурная схема КС с n степенями свободы, а затем в соответствии с предложенным методом расчетным путем в замкнутой форме определяются все собственные (резонансные) частоты данной КС. В данном методе не используются численные решения, он аналитически точен.

Литература

1. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. – М.: Наука, 1965. – 560 с.
2. Вибрации в технике: В 6-ти т. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 352 с.
3. Анго Андре. Математика для электро- и радиоинженеров / Андре Анго. – М.: Наука, 1965. – 780 с.
4. Божко А. Е. Динамико-энергетические связи колебательных систем / А. Е. Божко, Н. М. Голуб. – Киев: Наук. думка, 1980. – 188 с.
5. Пановко Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я. Г. Пановко, Н. И. Губанова. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

Поступила в редакцию
11.01.11

УДК 621.452.3.002.3:669.295:621.787

В. Н. Павленко, канд. техн. наук

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского

«Харьковский авиационный институт»

(Украина, г. Харьков, e-mail: v.pavlenko@khai.edu)

УЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ УПРОЧНЕНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Проведены исследования остаточных напряжений, сформированных в поверхностных слоях образцов из титановых сплавов, прошедших отжиг, обработку виброполированием и упрочненными шариками с различной интенсивностью на ультразвуковой установке. Установлены закономерности поверхностного упрочнения наклепом сплава ВТ 8 в связи с устойчивостью остаточных напряжений.

Проведено дослідження залишкових напружень, сформованих у поверхневих шарах зразків із титанових сплавів, що пройшли відпал, оброблених віброполіруванням і зміцнених кульками з різною інтенсивністю на ультразвуковій установці. Установлено закономірності поверхневого зміцнення наклепуванням сплаву ВТ 8 у зв'язку зі стійкістю залишкових напружень.

Введение

При разработке технологии изготовления лопаток компрессора из титановых сплавов необходимо задавать параметры шероховатости, наклёпа и остаточных напряжений по сечению заготовки. Перечисленные параметры формируются исходя из применяемых методов поверхностно-пластической обработки материала.

На практике это является трудновыполнимой задачей, так как механизм формирования остаточных напряжений в лопатках, имеющих сложный профиль (особенно на кромках), остаётся ещё недостаточно изученным.

Формирование поверхностного слоя лопаток компрессора при упрочнении происходит в результате взаимосвязанных явлений, происходящих в очаге деформирования и в прилегающих к нему зонах: многократных упруго-пластических деформаций, изменении пластических свойств металла, трения, изменении микро- и макроструктуры.

Как отмечают авторы работы [1], на глубину пластически деформированного слоя наибольшее влияние оказывает продолжительность ультразвукового упрочнения шариками.

Авторы работ [2, 3] и др. отмечают резкое изменение уровня остаточных сжимающих напряжений у поверхности лопаток при варьировании режимами поверхностно-пластического деформирования (ППД). По данному вопросу нет единой точки зрения. В работе [3] это явление объясняется контактной схемой деформации, в работе [2] – локальным нагревом тонкого поверхностного слоя. Однако в них не учитываются соотношения пластических и упругодеформированных слоев металла, а также уровень и знак остаточных напряжений, созданных в процессе предшествующей обработки.

В работе [4] считают, что характер напряженного состояния поверхностного слоя зависит от соотношения сил трения, возникающих в зоне контакта упрочняющих тел и поверхности детали.

Для титановых сплавов основное значение имеет повышение прочности и однородности характеристик поверхностного слоя, а также устранение неблагоприятного влияния предшествующей обработки. К настоящему моменту накоплен значительный объём данных, свидетельствующих о решающем влиянии различных методов ППД на формирование поверхностного слоя и уровень выносливости деталей ГТД. Однако дополнительное изучение влияния остаточных напряжений на эффективность поверхностного упрочнения титановых сплавов остается актуальной задачей.

Целью данной статьи являлось изучение распределения остаточных напряжений в поверхностном слое титановых сплавов при различных видах поверхностно-пластического деформирования и установление закономерностей поверхностного упрочнения сплава ВТ 8 в связи с устойчивостью остаточных напряжений.

Дробеструйная обработка на всех режимах приводит к образованию сжимающих остаточных напряжений, величина которых существенно зависит от диаметра шариков D и продолжительности процесса τ [5]. Для сплава ВТЗ-1 максимальному уровню сжимающих остаточных напряжений соответствует давление воздуха $P=0,3$ МПа и диаметр шариков $D = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м.

При виброгалтовке шариками в антикоррозионной жидкости происходит уменьшение шероховатости за счёт полировального эффекта, создаваемого скользящими соударениями шариков и лопаток в контейнере, который колеблется в трёх взаимно перпендикулярных направлениях [6]. Гидрогалтовка дробью примерно в такой же степени приводит к улучшению характеристик поверхностного слоя лопаток при большей интенсивности упрочнения.

Проведенные исследования остаточных напряжений, сформированных в поверхностных слоях образцов из сплава ВТ8, прошедших отжиг, обработанных окончательно виброполированием и упрочненных шариками с различной интенсивностью на ультразвуковой установке, приведены на рис. 1. Исследованиям в этом направлении занимались также авторы в работе [7].

Как видно из рис. 1, полирование образцов из сплава ВТ 8 абразивными гранулами нейтрализует остаточные растягивающие напряжения, достигающие 100 МПа после отжига, и формирует сжимающие остаточные напряжения до 350 МПа с глубиной залегания 40...50 мкм. Последующее ультразвуковое упрочнение шариками увеличивает уровень и глубину залегания сжимающих напряжений до 80...100 мкм, а максимальный уровень остаточных напряжений – до 500 МПа.

Результаты исследований сплава ВТ-3 по установлению закономерностей распространения остаточных напряжений, сформированных в поверхностных слоях, приведены на рис. 2.

Максимальные растягивающие напряжения после отжига образцов из сплава ВТ3-1 достигают 80 МПа на глубине залегания 20...40 мкм. Проведение виброполирования формирует сжимающие остаточные напряжения до 300 МПа с глубиной залегания до 40 мкм. На глубине 40...80 мкм наблюдается появление незначительных растягивающих напряжений. Дальнейшее ультразвуковое упрочнение шариками увеличивает уровень и глубину залегания сжимающих напряжений до 120...180 мкм, а максимальный уровень остаточных напряжений – до 400 МПа.

Таким образом, можно считать, что у лопаток из сплава ВТ3-1 сопротивление поверхностного слоя силовому воздействию сердцевины будет значительно выше за счет большей склонности к упрочнению, чем у сплава ВТ8, и соответственно образуется более низкий уровень остаточных сжимающих напряжений.

Характерно, что виброполирование приводит к появлению остаточных сжимающих напряжений на образцах из сплава ВТ8 и ВТ3-1 примерно одинакового уровня и глубиной одинаковой интенсивности залегания 40...80 мкм.

Для установления закономерностей поверхностного упрочнения наклепом сплава ВТ 8 в связи с устойчивостью остаточных напряжений изучались цилиндрические образцы корсетной формы диаметром 7,5 мм, разделенные на четыре группы. Первые две группы образцов, одна из которых была виброупрочнена, вылеживались в течение года без нагрузки. Вторые две группы образцов, одна из которых также была виброупрочнена, в течение года подвергались статическому нагружению при изгибе. Напряжение в образцах составляло $\sigma = 500$ МПа.

С целью более точного определения пределов выносливости испытыва-

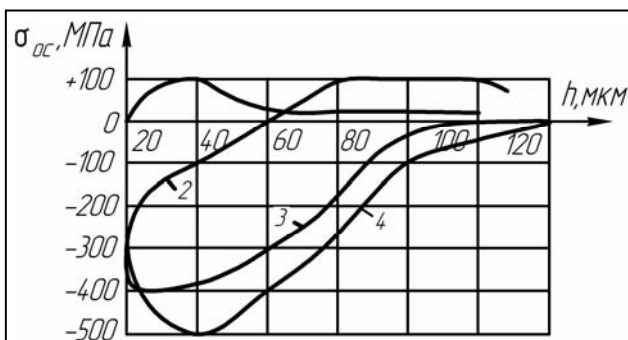


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений в образцах из сплава ВТ8 после:
1 – отжига; 2 – виброполирования;
3 – УЗУ ($I = 35 \dots 40$ мА); 4 – УЗУ ($I = 50 \dots 55$ мА)

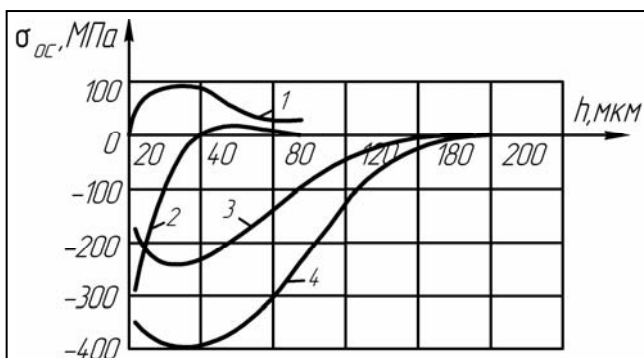


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в образцах из сплава ВТ3-1 после:
1 – отжига; 2 – виброполирования;
3 – УЗУ ($I = 55 \dots 60$ мА); 4 – УЗУ ($I = 70 \dots 75$ мА)

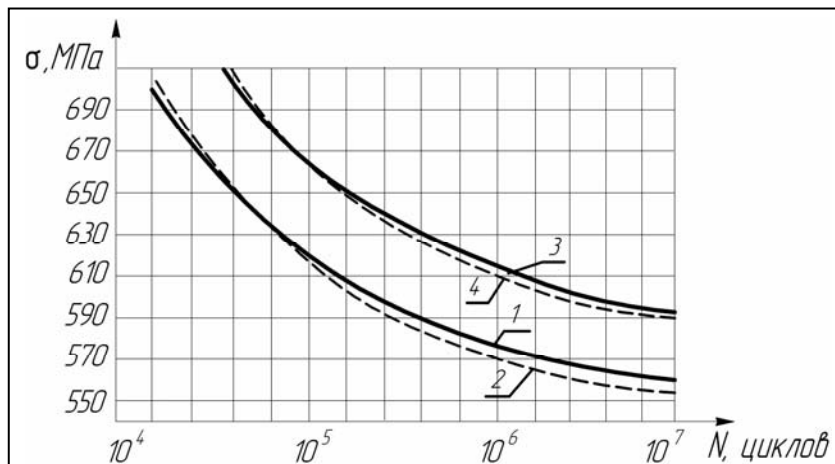


Рис. 3. Кривые усталости образцов:

1 – неупрочненные без выдержки; 2 – неупрочненные после выдержки;
3 – упрочненные без выдержки; 4 – упрочненные после выдержки

ния части образцов каждого варианта проводились по схеме ступенчатого нагружения. Другая часть образцов испытывалась на верхних уровнях напряжений. Это позволяло не только определить пределы выносливости, но и построить кривые усталости (см. рис. 3).

В табл. 1 сведены пределы выносливости образцов всех вариантов.

Из приведенных данных следует, что коэффициент упрочнения

образцов без выдержки под нагрузкой $K_V = 1,05$, а образцов после выдержки под нагрузкой $K_V = 1,07$. Изменения пределов выносливости образцов в связи с выдержкой под нагрузкой неупрочненных и упрочненных образцов практически не произошло. Полученные отклонения являются следствием рассеивания сопротивления усталости. Надо считать, что выдержка под нагрузкой при изгибе в одной плоскости в течение года практически не привела к изменению сопротивления усталости образцов.

Таблица 1. Значения пределов выносливости образцов упрочненных и неупрочненных без и после выдержки

Без выдержки под нагрузкой		После выдержки под нагрузкой	
неупрочненные	упрочненные	неупрочненные	упрочненные
$\sigma_{-1} = 562$ МПа	$\sigma_{-1} = 595$ МПа	$\sigma_{-1} = 555$ МПа	$\sigma_{-1} = 591$ МПа

Для подтверждения этого вывода проведен статистический анализ. Результаты вычислений представлены в табл. 2. Предел выносливости исходных образцов без выдержки под нагрузкой $\sigma_{-1} = 562$ МПа укладывается в доверительный интервал значений пределов выносливости исходных образцов, выдержанных под нагрузкой $\sigma_{-1}^B = 570,5$ МПа – $\sigma_{-1}^H = 539$ МПа. Также предел выносливости исходных образцов, выдержанных под нагрузкой $\sigma_{-1} = 555$ МПа, находится в доверительном интервале значений пределов выносливости образцов, не выдержанных под нагрузкой, $\sigma_{-1}^B = 606,5$ МПа – $\sigma_{-1}^H = 517,4$ МПа.

Аналогичные результаты имеют место для упрочненных образцов.

Предел выносливости упрочненных образцов без выдержки под нагрузкой $\sigma_{-1} = 595$ МПа попадает в доверительный интервал значений пределов выносливости упрочненных образцов, выдержанных под нагрузкой, $\sigma_{-1}^B = 613,9$ МПа – $\sigma_{-1}^H = 568,2$ МПа. Также предел выносливости упрочненных и выдержанных под нагрузкой образцов $\sigma_{-1} = 591$ МПа попадает в доверительный интервал пределов выносливости образцов без выдержки под нагрузкой $\sigma_{-1}^B = 625,7$ МПа – $\sigma_{-1}^H = 564$ МПа.

Анализ экспериментальных данных, полученных при испытании образцов из сплава ВТ8, изготовленных из прутка и поковки, показывает, что эффект упрочнения снижается при увеличении базового числа циклов. В табл. 3 показаны результаты подсчетов коэффициентов K_V .

Таблица 2. Результаты статистического анализа экспериментальных данных, полученных при испытании образцов из сплава ВТ8 в связи с длительной выдержкой под нагрузкой

Варианты образцов	Исходные образцы без выдержки	Исходные образцы после выдержки	Упрочненные образцы без выдержки под нагрузкой	Упрочненные образцы после выдержки под нагрузкой
σ_{-1} , МПа	562	555	595	591
$S_{\sigma_{-1}}$, МПа	62,45	17,09	48,32	38,50
N образцов	5	5	6	7
$d / S_{\sigma_{-1}}$	0,80	2,92	0,517	0,65
G	0,97	1,235	0,94	0,955
σ_{-1}^B , МПа	606,5	570,5	625,7	613,9
σ_{-1}^H , МПа	517,4	539,5	564,6	568,2

Заготовки образцов подвергались термообработке по трем режимам, что обеспечивало трем партиям образцов различную структуру и механические свойства.

Партия № 1: термообработка – 920 °С – 1 час → 650 °С – 2 часа → воздух;

Партия № 2: термообработка – 960 °С – 1 час → воздух + 870 °С – 1 час → 650 °С;

Партия № 3: термообработка – 1050 °С – 1 час → воздух + 870 °С – 1 час → 650 °С – 2 часа → воздух.

Таблица 3. Значения коэффициентов упрочнения K_V в зависимости от базового числа циклов

База циклов	Прутки			Поковка		
	партия I	партия II	партия III	партия I	партия II	партия III
10^5	1,15	1,09	1	1,19		1,14
10^6	1,05	1,07	1	1,16		1,08
10^7	1,04	1,06	1	1,09	1,1	1

Подобные результаты получены при испытании образцов в связи с выдержкой их под нагрузкой. Коэффициенты K_V снижаются при переходе от базы $N = 10^5$ циклов к $N = 10^7$ циклов со значения $K_V = 1,08$ до $K_V = 1,05$.

Снижение эффективности упрочнения с увеличением базового числа циклов было также зарегистрировано, например, для сплава ВТЗ-1 в работе [8].

Можно предполагать, что при циклическом деформировании образцов из сплава ВТ8 в условиях изгиба с вращением происходит релаксация остаточных напряжений. Это вызывает снижение эффекта упрочнения с увеличением базового числа циклов нагружения.

Выводы

В данной работе установлены закономерности распространения остаточных напряжений по глубине образцов из титановых сплавов, которые подвергнуты отжигу, виброполированию и различным режимам ультразвукового упрочнения. Выявлено, что изменения пределов выносливости образцов в связи с выдержкой под нагрузкой неупрочненных и упрочненных образцов практически не произошло.

Полученные результаты можно использовать при прогнозировании, для титановых сплавов ВТ 8 и ВТ 3-1, величины остаточных напряжений и глубины их залегания для рассмотренных методов упрочняющей обработки

Список литературы

1. *Характеристики* поверхностного слоя некоторых лопаточных материалов после ультразвукового упрочнения / Я. И. Бляшко, В. А. Волосатов, Д. М. Бавельский [и др.] // Энергомашиностроение. – 1977. – № 5. – С. 25–26.

2. *Акимов Л. М.* Выносливость жаропрочных материалов / Л. М. Акимов. – М. : Metallurgy, 1977. – 152 с.
3. *Шнейдер Ю. Г.* Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1972. – 172 с.
4. *Отделка* и упрочнение поверхностей деталей машин выглаживанием сверхтвердыми материалами / Л. А. Хворостухин, Ю. П. Павлов, В. Н. Бибаев В. Н. [и др.]. – М. : ГОСИНТИ, 1971. – № 1/14-71. – 52 с.
5. *Характер* остаточных напряжений в приповерхностных слоях сплавов ВТЗ-1 и ВТ22 после дробеструйного поверхностного пластического деформирования / Р. Г. Гонтарева, Ю. В. Полоскин, Л. Е. Родкина [и др.] // Пробл. прочности. – 1982. – № 3. – С. 107–108.
6. *Корневский Е. Я.* Оценка эффективности упрочнения вибро- и гидрогалтовкой лопаток компрессора из стали 14X17H2 / Е. Я. Корневский, В. К. Яценко // Авиац. пром-сть. – 1984. – № 7. – С. 22–23.
7. *Богуслаев В. А.* Оценка эффективности методов упрочнения лопаток ГТД / В. А. Богуслаев, О. В. Рубель, Г. В. Пухальская // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1998. – № 2. – С. 49–51.
8. *Гликман Л. А.* К вопросу о причине повышения усталостной прочности при поверхностном пластическом деформировании титанового сплава / Л. А. Гликман, Б. Г. Гуревич // Некоторые вопросы прочности металлов : Межвуз. сб. – Л., 1975. – С. 30–32.

Поступила в редакцию
12.11.11