

УДК 621.78.011

М.А. ВИШНЯКОВ

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ (ТПУ) НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Приведены результаты исследования остаточных напряжений и усталостной прочности образцов из титановых сплавов ВТ9 и ВТ20, упрочненных термопластическим методом.

Механизм упрочнения при ТПУ можно уяснить на примере весьма простой схемы (рис. 1).

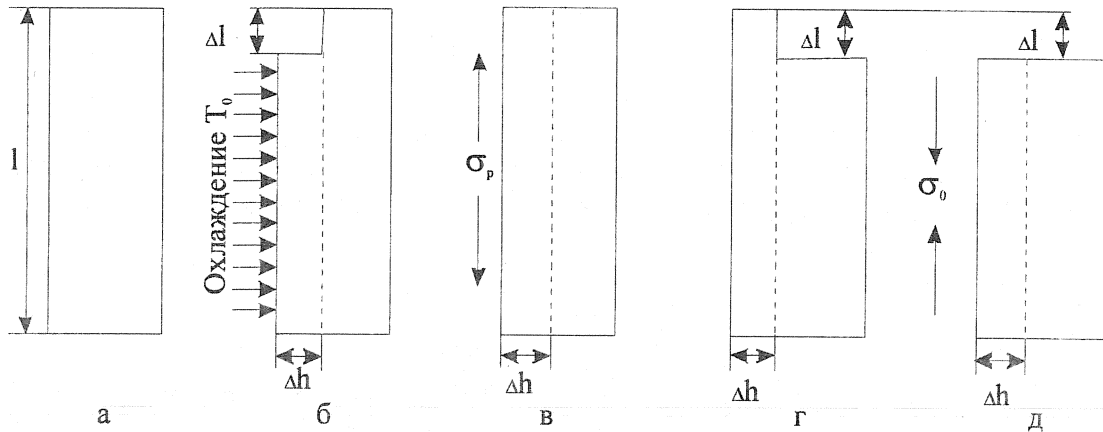


Рис.1. Схема формирования остаточных напряжений при ТПУ

Пусть некоторая пластина после нагрева до температуры T_H имеет длину l (см. рис.1, а). Резко охладим ее поверхность вдоль ширины b . Очевидно, что мгновенно охлажденный слой Δh будет стремиться сократить свою длину на величину $\Delta l = \alpha l (T_H - T_0)$ (см. рис.1, б), где α – коэффициент линейного расширения; T_0 – температура после охлаждения. Это сокращение невозможно, поскольку слой Δh является единым целым с пластиной.

Представим себе, что этот слой как бы сократился, а затем его удлинили и прикрепили к основной массе (см. рис.1, в). Очевидно, что этот процесс приведет к появлению в слое Δh растягивающих напряжений σ_p . В дальнейшем после остывания всей пластины фиктивно можно представить, что слой Δh будет длиннее пластины на величину Δl , если в нем имеют место пластические деформации (см. рис.1, г). Но поскольку неразрывность присутствует, то этот слой будет сжат и в нем возникнут остаточные напряжения сжатия (см. рис.1, д).

Напряжения σ_p , которые возникнут в результате охлаждения слоя Δh , могут быть рассчитаны по зависимости

$$\sigma_p = \frac{\alpha T_H E}{1 - \mu},$$

где α - термический коэффициент линейного расширения, $\frac{1}{\text{град}}$;

T_H - температура нагрева, °С;

E - модуль упругости, МПа;

μ - коэффициент Пуассона.

Для упругой области $\mu=0,3$. Модуль Пуассона введен, так как система относится к плосконапряженному состоянию.

Относительная температурная деформация, как известно, равна $\delta^* = \Delta l/l = \alpha T_H$. Как уже отмечалось, для формирования остаточных напряжений на уровне предела текучести необходимо, чтобы $\sigma_p \cong 2\sigma_{0,2}$, т.е.

$$\frac{\alpha T_H E}{1-\mu} \cong 2\sigma_{0,2},$$

откуда

$$T_H = \frac{2\sigma_{0,2}(1-\mu)}{\alpha \cdot E} \cong \frac{1,5\sigma_{0,2}}{\alpha \cdot E}.$$

Согласно этой формуле, при упрочнении титановых сплавов необходимо нагревать деталь до значительных температур. Это связано, в первую очередь, с тем обстоятельством, что для титановых сплавов модуль упругости почти в два раза меньше, чем для жаропрочных сплавов.

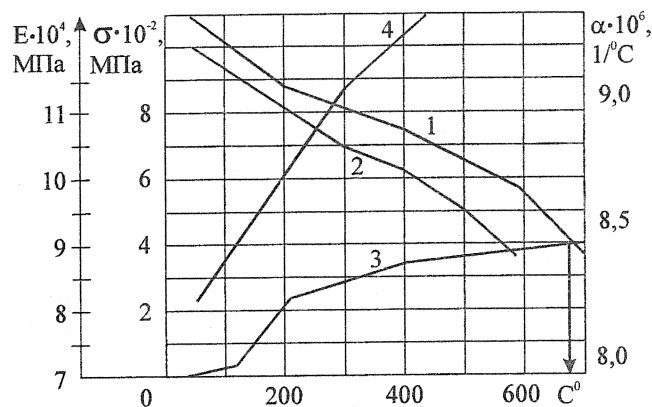


Рис.2. Определение температуры начала термопластических деформаций сплава ВТ9: 1 - предел текучести $\sigma_{0,2}$; 2 - модуль упругости E ; 3 - температурные напряжения σ_θ ; 4 - коэффициент линейного расширения α

Более точно температуру нагрева при ТПУ можно определить графоаналитически. Сущность графоаналитического метода заключается в нахождении точки пересечения экспериментальных кривых условного предела текучести и напряжения сжатия в нагретом поверхностном слое, указывающей температуру начала пластической деформации. Как видно из рис.2 и 3, пересечение кривых сжатия σ_θ и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ соответствует для сплава ВТ9 температуре $T=680^\circ\text{C}$, а для сплава ВТ20 - температуре $T=630^\circ\text{C}$.

В приведенном графоаналитическом методе использованы данные для $\sigma_{0,2}$, полученные при растяжении образцов. Учитывая, что процесс термопластического упрочнения описывается плосконапряженным состоянием, фактические температуры начала термопластической деформации должны быть больше, чем полученные графоаналитическим расчетом. Они могут быть приняты в пределах $700-750^\circ\text{C}$ для сплава ВТ9 и $650-700^\circ\text{C}$ для сплава ВТ20. При экспериментальных исследованиях оценивалось влияние температур в пределах: для сплава ВТ9 - $750\div 900^\circ\text{C}$, для сплава ВТ20 - $700\div 850^\circ\text{C}$.

При выборе диапазона изменения температур в процессе исследования ТПУ титановых сплавов ВТ9 и ВТ20 было учтено и следующее. Упрочнение сплава ВТ9 до температур порядка $950-980^\circ\text{C}$ (вблизи границы существования β -фазы) является нецелесообразным, так как это приводит к появлению α -фазы мартенситного типа, представляющей собой крупные зерна с грубоигольчатой внутризеренной структурой. Ее не удастся полностью исправить даже при последующем нагреве до температур $650-700^\circ\text{C}$. Рекристаллизация сплава ВТ20 происходит в пределах температур $800-950^\circ\text{C}$ [2]. Тем не менее, можно

допустить кратковременный нагрев этого сплава до температуры 850°C с последующим резким охлаждением, которое тормозит процесс образования и роста новых зерен.

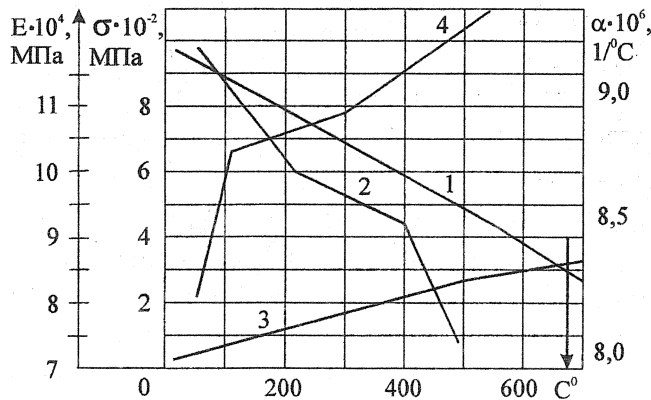


Рис. 3 Определение температуры начала термопластических деформаций сплава VT20: 1 - предел текучести $\sigma_{0,2}$; 2 - модуль упругости E; 3 - температурные напряжения σ_{θ} ; 4 - коэффициент линейного расширения α

стного слоя материала и образованию фазовых остаточных напряжений сжатия. При эксплуатации детали под воздействием температурно-силовых нагрузок неравновесная структура с избыточной β -фазой постепенно переходит в равновесную высокодисперсную структуру, состоящую из смеси частиц α и β -фаз - продуктов распада β -фазы. В итоге повышаются прочностные характеристики материала ($\sigma_b, \sigma_{0,2}$), а его пластичность (δ, ψ) обеспечивается благодаря наличию остаточной первичной α -фазы. Таким образом, на первом этапе эксплуатации детали, упрочненной термопластическим методом, основную роль в повышении усталостной прочности играют сжимающие остаточные напряжения. В дальнейшем в процессе работы метастабильная структура с избыточной β -фазой перестраивается в равновесную структуру, состоящую из мелкодисперсной смеси α и β -фаз, что вызывает дополнительное повышение предела выносливости. В этих условиях релаксация остаточных напряжений, которая происходит в результате воздействия температуры и переменных нагрузок, не должна вызывать снижение работоспособности термоупрочненных деталей.

Для подтверждения указанного предположения были проведены усталостные испытания плоских образцов из сплавов VT9 и VT20. Образцы прошли полный цикл технологической обработки, характерный для изготовления лопаток компрессора из соответствующего сплава. Для анализа влияния технологической обработки на предел выносливости образцов были предусмотрены следующие варианты: а) отжиг; б) отжиг + ТПУ; в) отжиг + ТПУ + полировка.

В качестве исходного варианта обработки использовались образцы после отжига в аргоне для снятия внутренних напряжений после механической обработки. Образцы из сплава VT9

При этом можно ожидать, что механические характеристики упрочненного материала не изменятся.

Необходимо отметить, что для двухфазных $\alpha+\beta$ -сплавов типа VT9 образование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений может быть вызвано не только неравномерным распределением температур по сечению детали, но структурно-фазовыми превращениями.

Известно, что при нагреве титанового сплава VT9 до температур 850-900°C происходит увеличение количества β -фазы в его структуре, что приводит к увеличению удельного объема поверхно-

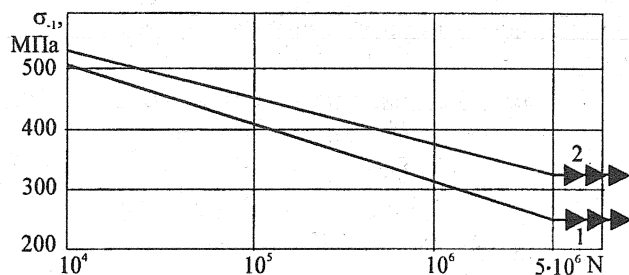


Рис.4. Пределы выносливости образцов из сплава VT9: 1 - исходные (отжиг); 2 - отжиг + ТПУ ($T=900^\circ\text{C}$)+полировка; ($T_{\text{исп}}=400^\circ\text{C}$, $\sigma_m=150$ МПа)

Образцы из сплава ВТ9 отжигались по режиму: нагрев до 950°C, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до температуры 530°C, выдержка в течение 6 ч, охлаждение с печью.

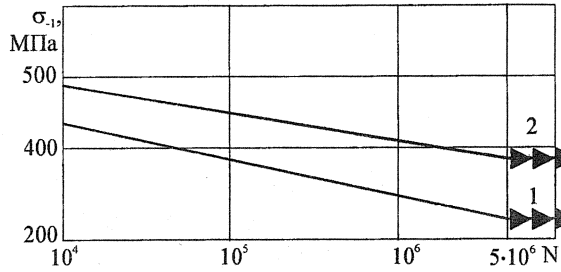


Рис.5. Пределы выносливости образцов из сплава ВТ20: 1 - исходные (отжиг); 2 - отжиг + ТПУ + полировка ($T_{исп}=250^{\circ}\text{C}$, $\sigma_m=150$ МПа)

Аналогичная обработка для сплава ВТ20 проводилась при нагреве до температуры 830°C; выдержка в течение 1,5 часа и охлаждение с печью. Термопластическое упрочнение осуществлялось на режимах: $T=900^{\circ}\text{C}$ (для сплава ВТ9); $T=850^{\circ}\text{C}$ (для сплава ВТ20). Для приближения условий испытания к реальным условиям эксплуатации образцы испытывались при максимальных рабочих температурах: 400°C (для сплава ВТ9) и 250°C (для сплава ВТ20). Так как исследования на образцах должны имитировать нагрузки на лопатки, то за основу был взят асимметричный цикл

нагружения с величиной асимметрии $\sigma_m=150$ МПа. При определении предела выносливости для сравнительных испытаний была принята база $N=5 \cdot 10^6$ циклов. Методика проведения испытаний соответствует описанной в работе [3]. Исследования проводились на машине "DVL" с двусторонним нагружением при частоте $f=22$ Гц.

Результаты исследования усталостной прочности образцов при различных вариантах обработки представлены на рис.4 и 5. Они показывают, что предел выносливости образцов из сплава ВТ9, упрочненных термопластическим методом, равен $\sigma_{-1}=340$ МПа (величина снятого газонасыщенного слоя составляет 10 мкм), что на 42% выше, чем у образцов, не прошедших термопластическое упрочнение ($\sigma_{-1}=240$ МПа). Решающую роль в этом сыграли сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое с максимумом на поверхности и фазово-структурные превращения, в результате которых неравновесная структура с избыточным количеством β -фазы превратилась в высокодисперсную структуру, имеющую высокие показатели предела выносливости. Необходимо отметить, что с увеличением базы испытания относительный прирост $\Delta\sigma_{-1}$ растет. На поверхности образцов возможно формирование газонасыщенного слоя толщиной 25-30 мкм, характеризующего повышенной хрупкостью и удаляемого полировкой.

Испытания образцов из сплава ВТ20 со снятым газонасыщенным слоем после ТПУ показали, что их предел выносливости $\sigma_{-1}=425$ МПа, что на 27% больше, чем у неупрочненных образцов (см. рис.5).

Таким образом, усталостные испытания подтвердили эффективность применения термопластического упрочнения для титановых сплавов с $\alpha\text{си } \alpha+\beta$ - структурами [1].

Как указывалось ранее, остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое детали в процессе ее эксплуатации, релаксируют. Это является

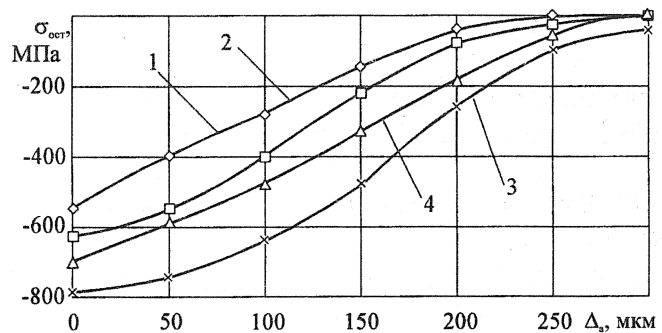


Рис.6. Релаксация остаточных напряжений в образцах. Режимы ТПУ: $T=900^{\circ}\text{C}$ (ВТ9) и 850°C (ВТ20); $P=0,5$ МПа; 2,3 - до испытания; 1,4 - после испытания. 1, 2 - ВТ20; 3, 4 - ВТ9

следствием длительного воздействия температурного фактора, а также статических и циклических напряжений. Для определения влияния указанных факторов на степень релаксации остаточных напряжений сравнивались величины напряжений после термопластического упрочнения образцов из сплавов BT9 и BT20 с результатами остаточных напряжений после испытаний.

Для исследования остаточных напряжений из центральной части усталостных образцов электроэрозионным способом были вырезаны плоские образцы размером 4x12x100 мм. При усталостных испытаниях образцы подвергались воздействию рабочих температур $T=400^{\circ}\text{C}$ (BT9) и $T=250^{\circ}\text{C}$ (BT20) и циклических нагрузок величиной соответственно $\sigma_a=340$ МПа и $\sigma_a=425$ МПа в течение 60 ч. С учетом асимметрии максимальные рабочие напряжения составляют для образцов из сплава BT9 $\sigma_{\max}=490$ МПа и для сплава BT20 $\sigma_{\max}=575$ МПа. Как следует из приводимых данных, релаксация остаточных напряжений для условий испытаний не превышает величины 12-15% (рис.6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишняков М. А. Разработка метода ТПУ с целью повышения эксплуатационных свойств деталей ГТД из титановых сплавов: Дис. канд.техн.наук., Куйбышев, 1983.
2. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 540 с.
3. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний: Справочник. М.: Металлургия, 1978. 304 с.

Самарский государственный технический университет

УДК 621.892

В.Г. КРУЦИЛО

ВЫНОСЛИВОСТЬ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ (ТПУ)

Приведены результаты исследований остаточных напряжений и усталостной прочности лопаток из жаропрочных материалов. Показано преимущество упрочнения методом ТПУ по сравнению с методами ППД.

Для определения эффективности метода термопластического упрочнения лопаток турбины и компрессора из жаропрочных сплавов была проведена работа по определению влияния параметров ТПУ при упрочнении на циклическую прочность лопаток. С этой целью были испытаны несколько партий лопаток из различных жаропрочных сплавов. При этом проводились сравнительные исследования лопаток, обработанных по серийной технологии и после термопластического упрочнения на различных режимах.

В результате испытаний по основному тону на частоте $f=6000...6200$ Гц при $T_{\text{исп}}=20^{\circ}\text{C}$ установлено, что предел выносливости на базе $N=2 \times 10^7$ циклов для лопаток, изготовленных по серийной технологии, составляет $\delta_{-1}=270$ МПа (рис.1, кривая 1). После термоупрочнения при температуре $T=650^{\circ}\text{C}$ предел выносливости возрос до значений $\delta_{-1}=370$ МПа (кривая 2), т.е. на 37%.