

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%.

Предел выносливости для лопаток из сплава ЭИ598ВД устанавливался при комнатной температуре по основному тону на базе $N=2 \times 10^7$ циклов для 2-х партий лопаток: одна из них изготавливалась по серийному варианту, а вторая подвергалась термоупрочнению после окончательного изготовления. Результаты испытаний показаны на рис.2. Из приведенных данных следует, что предел выносливости для серийных лопаток составляет 325 МПа (кривая 3). Термопластическое упрочнение повышает эту величину до $\delta_{-1}=500$ МПа (кривая 4), т.е. на 57%.

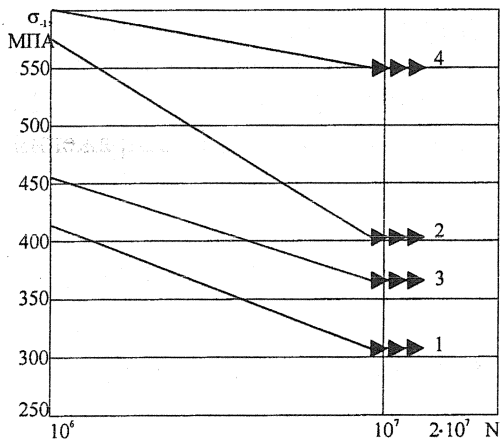


Рис.1. Пределы выносливости лопаток (1,2 - сплав ЭИ598) и (3,4 - сплав ЭИ598 ВД), изготовленные по серийной технологии (1,3) и с термоупрочнением (2,4)

В этом случае упрочняются не только перо и радиус перехода, но и трактовая поверхность бандажной полки.

Термоупрочнение этих лопаток проводилось перед операцией "Алитирование". Финишной перед ТПУ была операция "Виброшлифование". При отработке режима ТПУ исследовались остаточные напряжения при температурах нагрева $T=650; 700; 750^\circ\text{C}$. Время выдержки лопаток в печи $\tau=25$ мин. Давление воды в камерах охлаждения $P_k=0,5$ МПа.

При испытаниях было обнаружено весьма важное явление. Лопатки, упрочненные ТПУ после выдержки в среде аргона при температуре $T=800^\circ\text{C}$ в течение $\tau=100$ ч, дали прирост предела выносливости на 62%. Этот эффект может быть результатом снятия деформационного упрочнения (наклепа), который возникает после операции виброшлифования, что приводит к более выраженному проявлению положительного влияния остаточных напряжений сжатия. Уместно заметить, что лопатки турбины работают при $T=800^\circ\text{C}$, что благоприятно проявляется и при эксплуатации изделия.

Поскольку остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое лопатки оказывают положительное влияние на усталость, с целью создания в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений большей величины партия тонких лопа-

При сравнительных испытаниях лопаток из сплава ЭИ437Б на основном тоне $f=5500$ Гц, $T_{\text{исп}}=20^\circ\text{C}$ установлено, что лопатки, изготовленные по принятой на производстве технологии, имеют предел выносливости равный $\delta_{-1}=210$ МПа (рис.2, кривая 1). Последующее термопластическое упрочнение при температуре $T=600^\circ\text{C}$ и $P=0,5$ МПа способствовало повышению этой величины до 280 МПа (рис.2, кривая 2), т.е. относительный прирост составил 33%.

Эффективность ТПУ была установлена и на относительно тонких, длинномерных лопатках из сплавов ЖС6Ф-ВИ и ЖС6КП. Одним из наиболее напряженных мест у лопаток является радиус перехода пера лопатки в бандажную полку. С целью упрочнения радиуса перехода были использованы решетки охлаждения, верхние 5 рядов отверстий которых расположены под углом 45° к поверхности

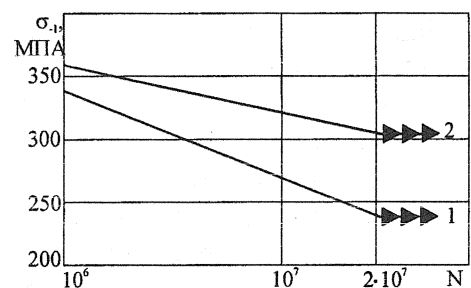


Рис.2. Кривые выносливости лопаток из сплава ЭИ437Б: 1 - без термоупрочнения; 2 - с термоупрочнением

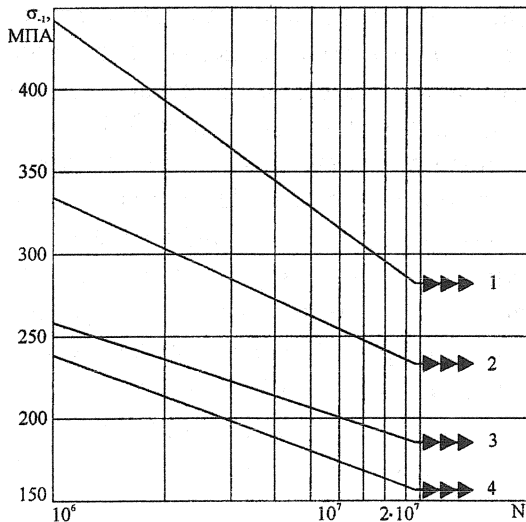


Рис.3. Пределы выносливости новых рабочих лопаток турбины (сплав ЭИ893): 1 - упрочненные ТПУ; 2 - упрочненные УЗУ; 3 - без упрочнения со стабилизирующим отпуском; 4 - без упрочнения и стабилизирующего отпуском

ток партия лопаток подверглась ТПУ с использованием накладок. Между накладкой $b=1.5$ мм из 13X12НВМФА (ЭИ961) и лопаткой помещалась фольга толщиной 0,05 мм в два слоя. Упрочнение лопаток проводилось в два приема: накладки укреплялись на спинке, и упрочнялось корыто, затем эта операция повторялась для упрочнения спинки.

Эти лопатки после механической обработки по серийной технологии, термообрабатывались в среде аргона при $T=950^{\circ}\text{C}$ в течение двух часов.

После виброшлифования и глянцовки остаточные напряжения формировались на уровне $\sigma_0=-(220...300)$ МПа с глубиной залегания ветви сжатия $\Delta a \approx 100$ мкм. После термообработки с последующим алитированием уровень остаточных напряжений снижается до значений $\sigma_0=-(90...150)$ МПа. Предел выносливости лопаток составил $\sigma_{-1}=240$ МПа.

Для лопаток с накладками применялся режим упрочнения: $T=750^{\circ}\text{C}$; $P=0,5$ МПа; $\tau=25$ мин. ТПУ проводилось до операции алитирования после термообработки в среде аргона при $T=950^{\circ}\text{C}$ с выдержкой $\tau=2$ ч. Остаточные напряжения на указанном режиме формировались на уровне $\sigma_0=-(550...610)$ МПа с глубиной залегания более 200 мкм. После операции алитирования остаточные напряжения снижались до значений $\sigma_0=-(200...300)$ МПа. Усталостные испытания проводились на воздушном вибраторе при $T=20^{\circ}\text{C}$; частоте $f=1150$ Гц; база $N=2 \times 10^7$ циклов. При аналогичных условиях проводились испытания и исходных, неупрочненных лопаток. Предел выносливости после ТПУ равнялся $\sigma_{-1}=320$ МПа, т.е. повышение выносливости составило 33%.

Изложенные выше данные относятся к относительно небольшим по своим размерам лопаткам, в том числе и тонкостенным. Однако полученные результаты и соответствующие выводы, как это будет показано ниже, в полной мере могут быть распространены на большеразмерные, массивные лопатки.

В настоящее время в эксплуатации на газоперекачивающих станциях используются газотурбинные агрегаты ГТК10-4. Лопатки 1-й ступени турбины изготавливаются из жаропрочного никелевого сплава ЭИ893 (ХН65ВМЮТ). Эти лопатки по своим размерам и массе условно можно отнести к классу большеразмерных. При их изготовлении используется поверхностное пластическое деформирование (ППД), осуществ-

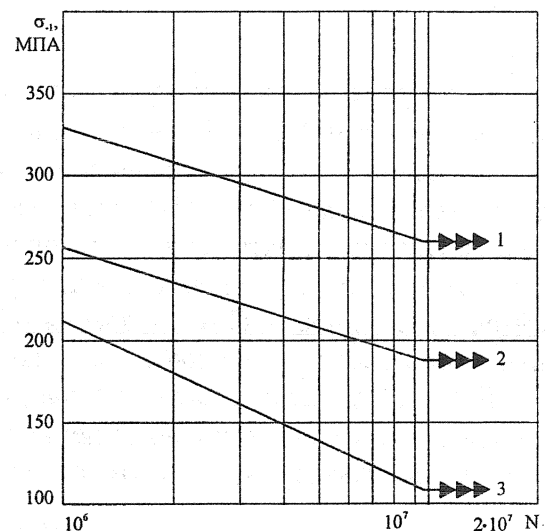


Рис.4. Пределы выносливости рабочих лопаток турбины, прошедших ремонт после эксплуатации (сплав ЭИ893): 1 - упрочненные ТПУ; 2 - упрочненные УЗУ; 3 - без упрочнения

вляемое на установке с ультразвуковым возбуждением упрочняющих элементов (шариков). Эксплуатация этих агрегатов показала, что долговечность лопаток весьма ограничена. После 2000-6000 ч работы прочностные характеристики лопаток резко падают, поэтому их ремонтируют с использованием повторного ультразвукового упрочнения (УЗУ).

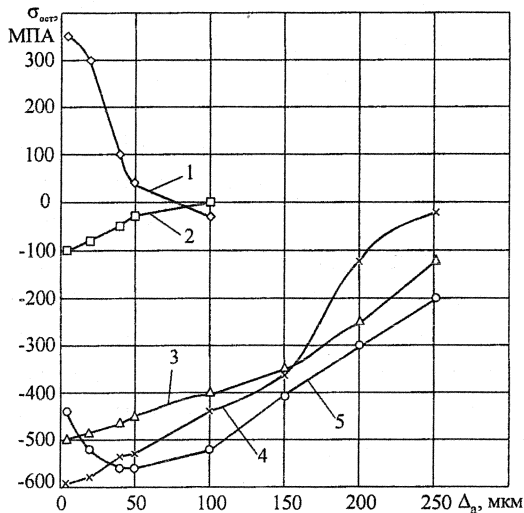


Рис.5. Остаточные напряжения в поверхностном слое лопаток турбины ГТК-10-4 (сплав ЭИ893): 1 - после полирования (в направлении подачи); 2 - после полирования (в направлении, перпендикулярном подаче); 3 - после ТПУ (в верхней части лопатки); $T_{упр}=750^{\circ}\text{C}$; $P=0,5$ МПа; 4 - после ТПУ (в нижней части лопатки); $T_{упр}=750^{\circ}\text{C}$; $P=0,5$ МПа; 5 - после ультразвукового упрочнения

эффект [1].

Повторное упрочнение УЗУ позволяет восстановить уровень предела выносливости до значения $\sigma_{-1}=220$ МПа. Аналогичная операция с использованием ТПУ увеличивает предел выносливости до уровня $\sigma_{-1}=280$ МПа (рис.4). Следует заметить, что остаточные напряжения после УЗУ и ТПУ достигают примерно одинакового уровня $\sigma_0=560-600$ МПа (рис.5). Однако характер эпюр остаточных напряжений по глубине имеет и отличия. Если при УЗУ максимум располагается на глубине $\Delta a \cong 50$ мкм, то при ТПУ последний локализуется у поверхности. С точки зрения усталости расположение максимума остаточных напряжений имеет определенное значение.

Большой уровень остаточных напряжений, достигающий предела текучести, а также относительно глубокое проникновение ветви напряжений сжатия ($\Delta a > 250$ мкм) связаны с масштабным фактором, о чем уже говорилось выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин: Монография / Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило, Г.Н. Гутман; - Самара, СамГТУ, 2000 – 216 с.

На рис.3 представлены результаты усталостных испытаний новых лопаток. Их усталость после УЗУ находится на уровне $\sigma_{-1}=240$ МПа. На этом же рисунке приведена кривая усталости лопаток, подвергнутых термопластическому упрочнению. После ТПУ предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов достигает $\sigma_{-1}=280$ МПа. После наработки ($\tau=2000-6000$ ч) предел выносливости новых лопаток, упрочненных УЗУ, снижается до уровня $\sigma_{-1}=140$ МПа.

Следует отметить, что метод ТПУ имеет более устойчивый эффект упрочнения, чем методы поверхностного пластического деформирования, в том числе ультразвуковое упрочнение (УЗУ). Это объясняется тем, что деформационное упрочнение негативно влияет на усталостную прочность, а сжимающие остаточные напряжения повышают предел выносливости. В процессе ТПУ формируются благоприятные сжимающие остаточные напряжения при минимальном деформационном упрочнении, а при поверхностном пластическом деформировании хотя и формируются сжимающие остаточные напряжения, деформационное упрочнение снижает их положительный