

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ЗАДАННЫМИ КАЧЕСТВЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Курбатов В. П.

ОАО «Моторостроитель», г. Самара

Разработка технологического процесса для финишных операций ответственных деталей ГТД является важной задачей при создании качественных изделий.

После основной операции точения для улучшения микрогеометрии межлабиринтных поверхностей дефлекторов турбины ГТД, а также снятия больших растягивающих остаточных напряжений, вводятся операции травление поверхностей, абразивно-жидкостная и термическая обработка. После термической обработки остаточные напряжения снижаются до уровня $\sigma = +400 \dots 650$ МПа, а степень деформационного упрочнения до значений 23-28%.

Для дальнейшего снижения растягивающих остаточных напряжений и деформационного упрочнения перед операциями «обдувка микрошариками» вводится дополнительная абразивно-жидкостная обработка. В процессе этой операции снимается тонкий слой металла, а от ударов абразивных зерен происходит мягкое упрочнение. После этой операции и последующего полирования остаточные напряжения изменяют свой знак и достигают уровня $\sigma_0 = -(200-350)$ МПа, степень деформационного упрочнения снижается до $\approx 25\%$. Одновременно уменьшается и глубина проникновения напряжений сжатия до 20-70 мкм. Последней финишной операцией является поверхностно пластическое деформирование (ППД), которое выполняется упрочнением микрошариками на специальной дробеметной установке. Эта операция позволяет упрочнить все поверхности дефлектора. Введение этой операции предусматривает достаточного уровня сжимающих остаточных напряжений с целью увеличения усталостной прочности. Одновременно с наведением напряжений возникает и деформационное упрочнение (наклеп), степень которого достигает величины 50-70%. Последний фактор, как отмечалось ранее, для деталей из жаропрочных сплавов, работающих в условиях повышенных температур, является негативным фактором.

Дуализм «остаточные напряжения - деформационное упрочнение» является следствием любого процесса ППД, в том числе и при «упрочнении микрошариками».

Снижение величины деформационного упрочнения при одновременном сохранении высокого уровня остаточных напряжений предлагается решать следующим образом.

На основании диаграммы интенсивности напряжений определяются величину напряжений, соответствующих искомой относительной деформации. Например, для $\delta=0,5\%$ интенсивность напряжений составит $\sigma_1=1000$ МПа, а микротвердость согласно зависимости $H_V=3\sigma_1=3000$ МПа. На основании этих зависимостей определяется слой под поверхностью детали, в котором микротвердость будет равна величине $H_V=3000$ МПа. Глубина залегания этого слоя равна $\Delta a=70$ мкм. Аналогично для относительных деформаций $\delta=1\%$, $\delta=4\%$, $\delta=6\%$. Микротвердости и глубины их залегания будут соответственно равны: $H_V=3180$ МПа, $\Delta a = 70$ мкм; $H_V=3900$ МПа, $\Delta a = 20$ мкм; $H_V=4200$ МПа, $\Delta a=15$ мкм. На основании этих данных и графиков, делается заключение о максимальном снижении предела выносливости соответствующем относительной деформации $\delta=6\%$ и, что слой, которому соответствует эта деформация, располагается на глубине $\Delta a=15$ мкм, т.е. практически у самой поверхности детали.

Для сплава ЭП742УИД максимальная степень упрочнения может быть также определена. Так как, $\sigma_{\text{imax}}=\sigma_{0,2}$, то с учетом прочностных характеристик сплава ($\sigma_B=1372$ МПа, $\sigma_{0,2}=916$ МПа; $\varphi=17,7\%$), найдем необходимые параметры.

Из изложенного вытекает следствие: для того, чтобы уменьшить влияние деформационного упрочнения на усталостную прочность, необходимо тем или иным способом удалить некоторый слой с деформационным упрочнением так, чтобы, на поверхности осталась та часть его, где относительные деформации не превышали бы заданную величину. Например, для жаропрочного сплава ЭП742УИД $\delta=0,5...1\%$.

В этом случае снижение предела выносливости за счет влияния деформационного упрочнения составит $\Delta\sigma_{-1}=25...35$ МПа или $7...9\%$ вместо 23% .

Частичное удаление слоя с деформационным упрочнением осуществляется при электрополировании или при абразивно-жидкостной обработке. До операции упрочнение микрошариками удалить слой в пределах $\Delta h=50...70$ мкм.

Удаляя определенный слой с деформационным упрочнением, мы изменяем и остаточное напряженное состояние. Однако эта операция вполне допустима, так как остающееся остаточное напряженное состоя-

ние вполне достаточно с точки зрения повышения усталостных характеристик.

Влияние остаточных напряжений сжатия на предел выносливости исследовалось на образцах из сплава ЭП742УИД, упрочненных методом «термопластического упрочнения» (ТПУ). Как известно, при ТПУ можно навести остаточные напряжения сжатия практически без деформационного упрочнения ($\delta < 0,5\%$). Эпюры остаточных напряжений, приведенные при ТПУ, показывают зону разброса этих напряжений и позволяют управлять процессом оптимизации операций на финишном этапе обработки.

На основании приведенных данных можно заключить, что технологический процесс изготовления деталей типа дисков, дефлекторов, необходимо построить так, чтобы при достаточном уровне наводимых остаточных напряжений сжатия, деформационное упрочнение не превышало 0,5...1% относительной деформации, что соответствует 8-15% степени деформационного упрочнения (наклепа).

При удалении слоя с деформационным упрочнением $\delta = 1\% \Delta h = 50$ мкм, эпюры остаточных напряжений отсекаются до уровня $\sigma_0 = -(500...800)$ МПа. При этом необходимо учесть и возможное перераспределение напряженного состояния поверхностного слоя.

Снижение остаточных напряжений можно при этом оценить, используя расчетную зависимость для этих напряжений. Зависимость учитывает изменение напряжения в исследуемом слое при травлении заготовки и ранее удаляемого слоев. В нашем случае напряжения при снятии слоя $\Delta h = 50$ мкм уменьшаются, как показал И.А. Биргер, не более, чем на 10%, т.е. на поверхности детали они сохраняют значения на уровне $\sigma_0 \cong -(450...750)$ МПа. Реальные эпюры остаточных напряжений после удаления слоя $\Delta h = 50$ мкм. показывают их оптимальность. Для проверки расчетных данных, изложенных выше, были изготовлены две партии стандартных образцов из сплава ЭП742УИД, которые были упрочнены микрошариками на режиме, аналогичном применяемому при обдувке межлабиринтной зоны дефлектора. Затем одна партия прошла операцию по абразивно-жидкостной обработке, при которой с образцов был удален слой $\Delta h = 50$ мкм на сторону.

Полученные результаты усталостных испытаний на машине МУИ-10000 показали положительные эффект технологических решений. Прирост предела выносливости составил

$\Delta\sigma_{-1}=60$ МПа. В результате этого повышению предела выносливости с $\sigma_{-1}=360$ МПа для исходных образцов изменилось до $\sigma_{-1}=420$ МПа, т.е. относительное повышение предела выносливости составило 17%.

Аналогичные сопоставления для процесса упрочнения микрошариками с последующим снятием слоя $\Delta a=50$ мкм даст соответственно: $\sigma_{-1}=360$ МПа и $\sigma_{-1}=480$ МПа. Повышение предела выносливости для этого варианта равно 30%. Таким образом, предлагаемая методика построения технологических процессов на финишных операциях позволяет увеличить предел выносливости на 13%.

Результаты исследований получены при температуре 20 градусов С. В реальных условиях эксплуатации дефлектор работает при относительно высокой температуре, и можно с достаточной уверенностью утверждать, базируясь на имеющихся данных, что предложенная методика, позволяющая уменьшить негативное влияние деформационного упрочнения и приведет к еще большему увеличению установленных характеристик дефлекторов. В подтверждение сказанному можно привести данные исследования влияния температуры на выносливость образцов из сплава ЭИ598. Плоские образцы испытывались при комнатной температуре $T=20^{\circ}\text{C}$ и в условиях $T=750^{\circ}\text{C}$, база испытаний составляла $5 \cdot 10^6$ циклов. Все образцы были предварительно термообработаны. Одна часть образцов испытывалась в исходном виде, а другая после упрочнения ТПУ. При комнатной температуре были получены следующие результаты:

- после ТПУ $\sigma_{-1}=580$ МПа, а на исходных $\sigma_{-1}=410$ МПа. Остаточные напряжения, наведенные ТПУ ($\sigma_{\theta}=-700$ МПа), дали прирост усталости на 40%.
- Аналогичные опыты при температуре испытаний $T=750^{\circ}\text{C}$ соответственно показали $\sigma_{-1}=380$ МПа и $\sigma_{-1}=220$ МПа - относительное увеличение 80%.

Результаты этих опытов показывают, что образцы с минимальным наклепом дают более высокий относительный прирост предела выносливости при работе в условиях высоких температур. Очевидно, что этот эффект будет характерен и для натуральных деталей.

В настоящее время на ОАО «Моторостроитель» все детали типа дисков, дефлекторов после операции упрочнения микрошариками подвергаются абразивно-жидкостной обработке для снятия слоя 0,05 мм. Созданы специальные установки для проведения необходимых операций.