

УДК 621.892

А.Н. СКАЧКОВ

ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД С ПОКРЫТИЯМИ

Рассмотрен процесс формирования остаточных напряжений в лопатках ГТД с покрытием при термопластическом упрочнении. Приведены результаты влияния алитирования на напряженное состояние поверхностного слоя лопаток первой ступени турбины (ЖС6ФН), изготовленные по серийной технологии, а также подвергнутые термопластическому упрочнению перед операцией алитирования.

Для лопаток первых ступеней газотурбинных двигателей, работающих в условиях высоких температур, применяются теплозащитные покрытия. Разработана целая гамма этих показателей. Как правило, они представляют сложные системы $Ni - Cr - Al - Y$, $Ni - Cr - Fe - B - Si$, $Co - Cr - Al - Y$. Используются также покрытия ZrO_2 , стабилизированные 12% Y_2O_3 , и некоторые другие [1]. Для этих же целей применяется и процесс алитирования, при котором происходит насыщение поверхностного слоя детали алюминием с образованием интерметаллидных соединений $NiAl$, Ni_3Al . При нанесении покрытий используются различные методы, в том числе плазменные и электронно-лучевые. Температура, при которой наносятся покрытия и осуществляется процесс алитирования, примерно равна $T \cong 950^\circ C$. Время нанесения покрытий колеблется в пределах $\tau = 4-7$ ч, толщина слоя обычно составляет $\Delta h \cong 40-100$ мкм. После нанесения покрытия в процессе остывания детали в этом слое и в основном металле формируется определенное напряженное состояние как следствие того, что коэффициенты линейного расширения покрытия α_n и основного металла α_0 , а также соответственно модули упругости E_n и E_0 различны по величине. Так, по данным [1] коэффициенты линейного расширения для $NiAl - \alpha = 15 \cdot 10^{-6}$ 1/град; $Ni_3Al - \alpha = 8,5 \cdot 10^{-6}$ 1/град; $Al_2O_3 - \alpha = (6,8-8) \cdot 10^{-6}$ 1/град, $ZrO_2 - \alpha = 8,5 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Для этих материалов модули упругости колеблются в довольно широких пределах

$$E_n = (1,5 - 3,2) \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Для сравнения при $T = 20^\circ C$ жаропрочный сплав ЖС6ФН характеризуется величинами $\alpha \cong 10 \cdot 10^{-6}$ 1/град; $E = 1,7 \cdot 10^5$ МПа. Очевидно, что при остывании детали и покрытия, в основном за счет разности в коэффициентах линейного расширения, возникают остаточные напряжения. В зависимости от значений α_0 и α_n возможны напряжения обоих знаков. Чаще всего, как показывает опыт, формируются остаточные напряжения сжатия. Сказанное также вытекает из рассмотрения зависимости для определения относительной деформации, возникающей в покрытии при остывании детали, $\Delta \xi_n = -(\alpha_0 - \alpha_n)T$. Качественно эпюра остаточных напряжений в этом случае будет выглядеть как это показано на рис.1: в покрытии напряжения сжатия, а в детали - реактивные напряжения растяжения. При запуске двигателя на первом этапе в покрытии будут действовать благоприятные напряжения сжатия. При нагреве детали выше $T \cong 950^\circ C$ эпюры напряжений изменяют свой знак и в покрытии возникают растягивающие напряжения. С точки зрения работоспособности детали желательно, чтобы при рабочих температурах ($T > 950^\circ C$) в покрытии сохранялись напряжения сжатия.

Последнее может быть реализовано в условиях, когда перед нанесением покрытия деталь была термоупрочнена.

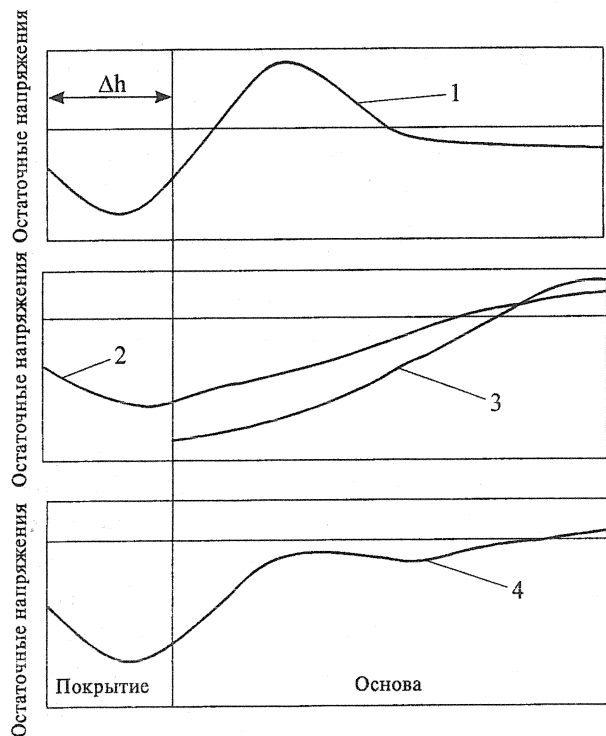


Рис.1. Схема формирования остаточных напряжений при нанесении покрытия. 1 – остаточные напряжения после нанесения покрытия; 2 – остаточные напряжения после ТПУ; 3 – остаточные напряжения за счет процесса релаксации напряжений; 4 – результирующая эпюра остаточных напряжений

В качестве иллюстрации сказанного на рис.1 эпюра остаточных напряжений после ТПУ изображена кривой 2. В процессе нанесения покрытия за счет релаксационных процессов остаточные напряжения снизятся, и их эпюра будет характеризоваться кривой 3. Однако, поскольку покрытие и основу за счет диффузии можно представить как единое целое, то в покрытии возникают напряжения сжатия как реакция на снижение остаточных напряжений в основе. При охлаждении сформируется новое напряженное состояние, которое будет следствием сложения эпюр 1 и 3. Новое напряженное состояние изобразится эпюрой 4. Однако в рабочем режиме на лопатках напряженное состояние будет характеризоваться эпюрой 3.

Влияние алитирования на напряженное состояние поверхностного слоя детали изучалось на лопатках первой ступени турбины (ЖС6ФН). Опытами были охвачены лопатки, изготовленные по серийной технологии, а также подвергнутые термопластическому упрочнению на режиме $T=750^{\circ}\text{C}$, $P=0,5$ МПа перед операцией алитирования. В дальнейшем из лопаток электроэрозионным способом вырезались образцы длиной

$l=60$ мм, шириной $b=5$ мм. Алитированию подвергалась наружная поверхность. При вырезке образцов по внутренней полости лабиринтные связи разрезались также электроэрозионным способом с последующей доработкой до плоскости механическими методами. Остаточные напряжения определялись на описанной ранее установке. Алитированный слой удовлетворительно снимается в травителе следующего состава:

плавиковая кислота – 30 мл/л;
азотная кислота – 100 мл/л;
серная кислота – 140 мл/л;
вода – 730 мл/л.

На рис.2, приведены результаты определения остаточных напряжений на образцах, вырезанных из лопаток, алитированных при $T^{\circ}=920^{\circ}\text{C}$ в течение $\tau=4$ ч. Перед алитированием лопатки прошли термовакуумный отжиг при $T^{\circ}=1235 \pm 5^{\circ}\text{C}$, при котором, как это уже отмечалось ранее, наследственные остаточные напряжения полностью снимаются.

Как следует из рассмотрения данных, приведенных на рис.2, в алитированном слое возникают остаточные напряжения сжатия величиной $\sigma_0=150\text{--}250$ МПа. Колебания уровня замеренных напряжений связаны с масштабным фактором, - образцы имели различную толщину. В более глубоких слоях имеют место растягивающие остаточные напряжения.

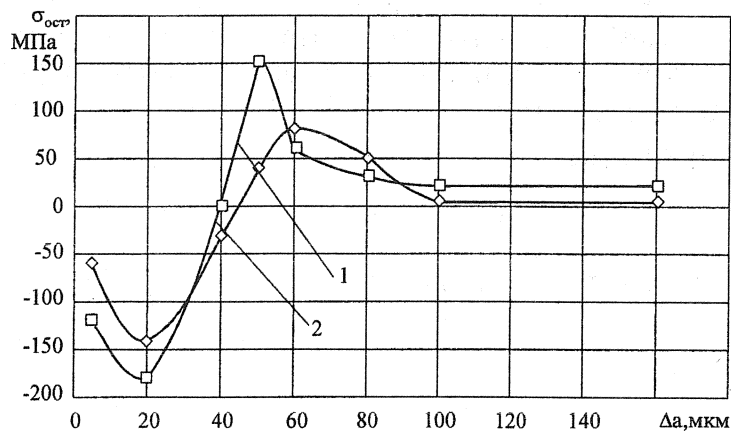


Рис.2. Остаточные напряжения в исходных алитированных лопатках (толщина алитированного слоя $\Delta h \cong 45$ мкм): 1 - $h = 1,8$ мм, 2 - $h = 2,6$ мм

На рис.3 приведены эпюры остаточных напряжений в образцах, вырезанных из алитированных лопаток, предварительно термоупрочненных. Режим упрочнения $T^\circ=750^\circ\text{C}$, $P=0,5$. В этом случае остаточные напряжения достигают величины $\sigma_0 = -400$ МПа при значительной глубине их проникновения. При алитировании на режиме $T^\circ=920^\circ\text{C}$, $\tau=4$ ч формируются остаточные напряжения в алитированном слое как реакция релаксации напряжений в основном материале, и за счет перепада температур при охлаждении.

Приведенные эпюры остаточных напряжений найдены при нормальной температуре. В рабочем состоянии, когда лопатки нагреты до температуры, соответствующей процессу алитирования, для исходных предварительно неупрочненных лопаток в алитированном слое остаточные напряжения будут отсутствовать.

Что касается лопаток, упрочненных ТПУ при температурах выше, применяемых при алитировании, то на рабочем режиме в алитированном слое будут действовать сжимающие остаточные напряжения как результат релаксационных процессов при алитировании. К этому следует добавить, что, по-видимому, с течением времени при работе термоупрочненных лопаток опять же за счет продолжающегося процесса релаксации в алитированном слое сжимающие остаточные напряжения будут расти.

Наличие остаточных напряжений сжатия, по крайней мере, в начальный период работы детали, является положительным фактором, так как со временем под поверхностью формируется благоприятный слой неподвижных дислокаций. Приведенные данные относятся к напряженному состоянию, возникающему при алитировании. Очевидно, что качественная картина сохранится и для случаев нанесения покрытий другими способами.

По-видимому, с точки зрения усталости, сдвиг точки перехода знака напряжений в сторону основного металла за счет предварительного упрочнения благоприятен.

Из рис. 2 и 3 следует, что при $T^\circ=20^\circ\text{C}$ остаточные напряжения в алитированном слое колеблются в пределах $\sigma_0 \cong -400$ МПа, однако эти данные относятся к формированию остаточных напряжений на гладких по-

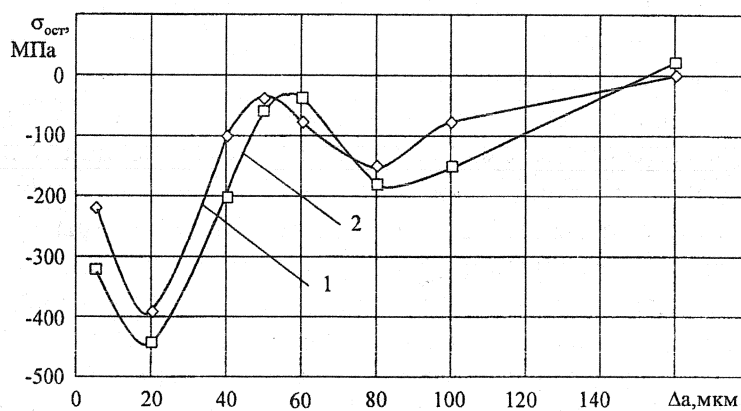


Рис.3. Остаточные напряжения в лопатках, прошедших ТПУ до алитирования (толщина алитированного слоя $\Delta h \cong 45$ мкм): 1, 2 - $h = 1,6 \dots 2,0$ мм

верхностях. Если экстраполировать эти результаты на внутреннюю область охлаждаемых лопаток, то в силу наличия многих концентраторов, как это следует из расчетов, выполненных методом конечных элементов, можно ожидать повышения уровня остаточных напряжений сжатия в местах резких переходов до величин $\sigma_0 = (500-700)$ МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гецов Л. Б. Детали газовых турбин (материалы и прочность). Л.: Машиностроение, 1982. 296 с.

Самарский государственный технический университет

УДК 621.787.4

В.Ф.СКВОРЦОВ, А.Ю.АРЛЯПОВ

КОНТАКТНЫЕ ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ЗАГОТОВКАХ С БЕСКОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНОК

Изложены методика и результаты экспериментальных исследований средних контактных давлений и параметров шероховатости поверхности при дорновании отверстий в заготовках с бесконечной толщиной стенок, даны рекомендации по выбору режимов дорнования отверстий малого диаметра.

Для обоснованного выбора режимов дорнования отверстий и расчета инструмента на прочность необходимо располагать сведениями о нормальных давлениях, возникающих в контакте рабочего конуса инструмента с обрабатываемой заготовкой (контактных давлениях). Имеющиеся в литературе данные о средних контактных давлениях в процессе дорнования отверстий в заготовках с бесконечной толщиной стенок ограничены [1]. Они относятся к обработке отверстий сравнительно большого диаметра ($d=32$ мм) с малыми натягами на зуб инструмента ($a=0,02...0,05$ мм) и с малыми суммарными относительными натягами ($\Sigma a/d \leq 0,01$).

Между тем в последнее время нами показано [2], что дорнование отверстий малого диаметра ($d=1...3$ мм) в заготовках с бесконечной толщиной стенок может осуществляться с суммарными относительными натягами до $\Sigma a/d=0,05...0,07$, обеспечивая повышение точности отверстий с учетом погрешностей формы с 11...12 до 6...7 квалитетов. В связи с этим значительный интерес представляет изучение контактных давлений в более широком диапазоне изменения режимов и условий дорнования, а также изучения связи контактных давлений с параметрами качества поверхностного слоя обработанных отверстий.

Исследования проводили на заготовках из сталей 20 (НВ120), 45 (НВ170), сплава Д16Т (НВ130) и меди М1 (НВ47) с диаметрами отверстий 15, 8, 3 и 1,2 мм и их глубиной не менее $3d$. Отверстия диаметром 15 и 8 мм растачивали; отверстия диаметром 3 и 1,2 мм получали сверлением, а затем для обеспечения высокой точности и малой шероховатости