

УДК 621.78.011:62-226.2(0433)

ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ С ЖАРОПРОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

© 2020 В.Г. Круцило, Л.П. Ситкина, И.Н. Разумова

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 12.05.2020

В статье приведена схема формирования остаточных напряжений при термопластическом упрочнении (ТПУ) деталей с покрытиями. Постановка задачи формулируется следующим образом: изучение влияния покрытий на жаропрочность, ползучесть, сопротивление усталости жаропрочных сплавов, что приводит к улучшению эксплуатационных и прочностных характеристик деталей ГТД. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое термически упрочненных деталей решалось подбором различных схем упрочнения при различных температурных полях и сравнивалось с температурой в однородных материалах, что позволило определиться с жаропрочными покрытиями. При расчете остаточных напряжений в упруго-пластической зоне применялся численный метод. Опытами были охвачены лопатки, изготовленные по серийной технологии и подвергнутые термопластическому упрочнению. Разработана целая гамма показателей для подбора покрытия ответственных деталей двигателя. Приведены экспериментальные результаты исследований остаточных напряжений при ТПУ. Анализ результатов исследования показал, что лопатки, упрочненные ТПУ имеют более высокие эксплуатационные показатели, чем упрочненные по серийной технологии.

Ключевые слова: Упрочнение металла, жаропрочные покрытия, остаточные напряжения, усталость, двигатель газотурбинный.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-77-81

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-48-630694

«Разработка физической модели механизма термопластического упрочнения материалов, работающих в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок».

Ответственные детали ГТД работают в условиях высоких температур и воздействия продуктов сгорания топлива, что вызывает необходимость эффективной защиты материала изделий. Широкое распространение в газотурбостроении получило алитирование [1-2].

Однако покрытия, полученные этим методом обладают недостаточной эрозионной стойкостью и термической стабильностью при температурах более 1000°C. В последнее время получили большое распространение многокомпонентные покрытия. Многочисленными исследованиями установлено, что формирование покрытий изменяет картину напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев, что в свою очередь оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей ГТД. В зависимости от многочисленных факторов, таких как; материал основы и покрытия, технологические режимы, вид упрочняющей

обработки и т.д., в покрытиях могут быть сформированы как растягивающие, так и сжимающие остаточные напряжения. Растягивающие остаточные напряжения вызывают такие негативные явления, как растрескивание и отслаивание покрытий, снижают их способность защищать основной металл, уменьшают усталостную прочность. Сжимающие остаточные напряжения оказывают благоприятное влияние на эксплуатационные характеристики деталей.

Актуальность вопроса изучения влияния покрытий на жаропрочность, ползучесть, сопротивление усталости и т.д. не вызывает сомнений. Исследования авторов [1-3] показывают, что влияние покрытий на сопротивление усталости жаропрочных сплавов носит сложный характер и зависит не только от способа получения покрытия и его состава, но и от термической обработки образцов с покрытием и температуры испытаний. Для сплава ЖС6У с алюминидным покрытием обнаружено уменьшение предела выносливости при симметричном цикле при температуре испытаний 550 °C и 1000 °C. Приводятся аналогичные зависимости для сплавов У500, НИМОНИК соответственно при T=743 °C и T=900 °C. Толщина покрытия в данных опытах составляла 25...30 мкм. Специальная термическая обработка позволила повысить предел выносливости. Установлено, что алюминидные покрытия

Круцило Виталий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: slp.samara@yandex.ru

Ситкина Лариса Петровна, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: slp.samara@yandex.ru

Разумова Ирина Николаевна, ассистент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: slp.samara@yandex.ru

толщиной 40...60 мкм не оказывают отрицательного влияния, а для сплава ZhS6n при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 950 и 1000 $^{\circ}\text{C}$, более толстые покрытия (>60 мкм) снижают усталостные характеристики. Авторы объясняют увеличение предела выносливости при низких температурах более высоким сопротивлением возникновению трещин поверхностного слоя по сравнению с основой.

Повышение рабочих температур и удельных нагрузок в зоне работы ответственных деталей газотурбинных двигателей (в частности, лопаток) предъявляют повышенные требования к поверхностному слою этих деталей, т.к. он определяет их работоспособность и долговечность. Улучшение эксплуатационных и прочностных характеристик деталей ГТД может быть достигнуто на базе конструкторских решений, использования новых материалов, прогрессивных технологических методов изготовления.

Для создания в поверхностном слое деталей благоприятного напряженно-деформированного состояния применяются различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако эффективность ППД снижается с увеличением рабочих температур. Это вызвано тем, что при повышенной температуре диффузионные процессы в деформационно-упрочненном поверхностном слое интенсифицируются.

Метод термопластического упрочнения, обеспечивающий формирование благоприятного остаточного напряженного состояния в поверхностных слоях детали при минимальных величинах деформационного упрочнения, является перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Процесс термопластического упрочнения ведется при относительно невысоких температурах, что исключает возможность фазовых или структурных изменений.

В последнее время широкое распространение получили методы защиты лопаток от действия высоких температур и агрессивной среды с помощью теплозащитных покрытий, нанесенными различными способами. Ввиду разности физико-механических свойств основы и покрытия и особенностей технологического процесса нанесения покрытия, в нем возникнут остаточные напряжения, которые оказывают значительное влияние на характеристики напряженно-деформированного состояния поверхности.

Дальнейшее изучение технологических возможностей термопластического упрочнения и, в особенности, для деталей с покрытиями (например, наружные и внутренние поверхности охлаждаемых лопаток ГТД с перфорациями), является одной из актуальных задач.

Задача определения остаточных напряжений в поверхностном слое термически упроч-

няемых деталей, в данном случае лопаток ГТД, решалась в несколько этапов.

На первом этапе необходимо проанализировать возможность эффективного применения к данному классу деталей различных схем упрочнения (ТПУ до покрытия, ТПУ после покрытия, ТПУ до и после покрытия). На выбор схемы упрочнения оказывают влияния такие параметры упрочняемой детали, как физико-механические свойства основы и покрытия, условия эксплуатации детали, ее геометрические параметры, требования к гарантированному ресурсу работы.

На втором этапе, при выбранной схеме упрочнения, необходимо определить температурные поля, возникающие в процессе охлаждения при ТПУ в деталях с покрытиями, учитывая при этом различия физико-механических свойств основы и покрытия. Картина температурных полей в этом случае будет, естественно, отличаться от распределения температуры в однородном материале.

Далее необходимо определить температурные напряжения, возникающие в процессе охлаждения в предположении, что материал основы и покрытия находятся в идеально-упругой области.

Зная реальные кривые деформирования материала основы и покрытия рассчитываются напряжения в упруго-пластической зоне. Учитывая нелинейную зависимость напряжений от деформаций, этот расчет ведется обычно численным методом. Широкое распространение здесь получил известный метод переменных параметров упругости (метод Биргера).

На последнем этапе, зная напряжения в идеально-упругом и в упруго-пластическом случае, по известной теореме Генки определяются остаточные напряжения, которые останутся после упрочнения детали с покрытием в ее поверхностном слое.

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 [7]. 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 $T \cong 950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время нанесения покрытий колеблется в пределах $\tau = 4\text{--}7$ ч, толщина слоя обычно составляет $\Delta h \cong 40\text{--}100$ 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 [2] коэффициенты линейного расширения для NiAl – $\alpha = 15 \cdot 10^{-6}$ 1/град; Ni₃Al – $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6}$ 1/град; Al₂O₃ – $\alpha = (6,8-8) \cdot 10^{-6}$ 1/град, ZrO₂ – $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6}$ 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 $T = 20^\circ\text{C}$ 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, $\Delta\xi = -(\alpha_0 - \alpha_n)T$. 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 $T \cong 950^\circ\text{C}$ эпюры напряжений изменяют свой знак, и в покрытии возникают растягивающие напряжения. С точки зрения работоспособности детали желательно, чтобы при рабочих температурах ($T > 950^\circ\text{C}$) в покрытии сохранялись напряжения сжатия.

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

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 вырезки 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.

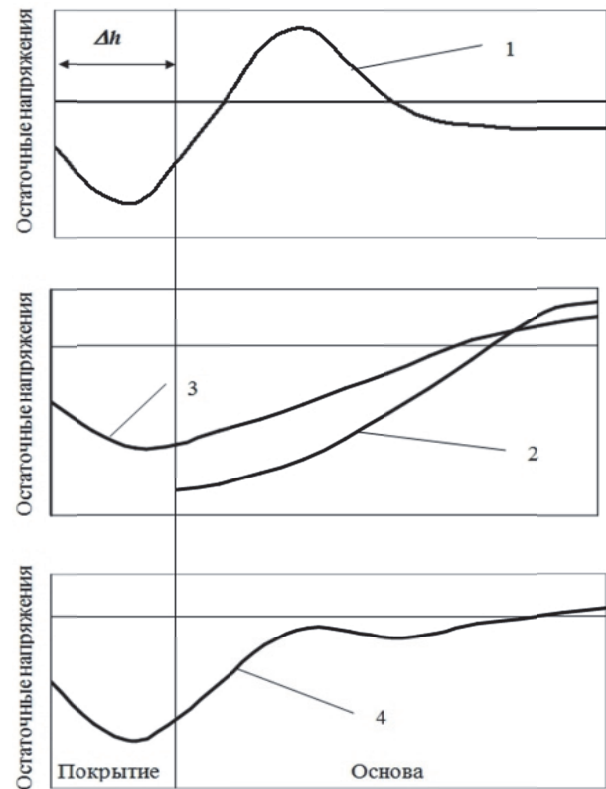


Рис. 1. Схема формирования остаточных напряжений при нанесении при нанесении покрытия:

- 1 – остаточные напряжения после нанесения покрытия;
- 2 – остаточные напряжения после ТПУ;
- 3 – остаточные напряжения за счет процесса релаксации напряжений;
- 4 – результирующая эпюра остаточных напряжений

На рис. 2 приведены результаты определения остаточных напряжений на образцах, вырезанных

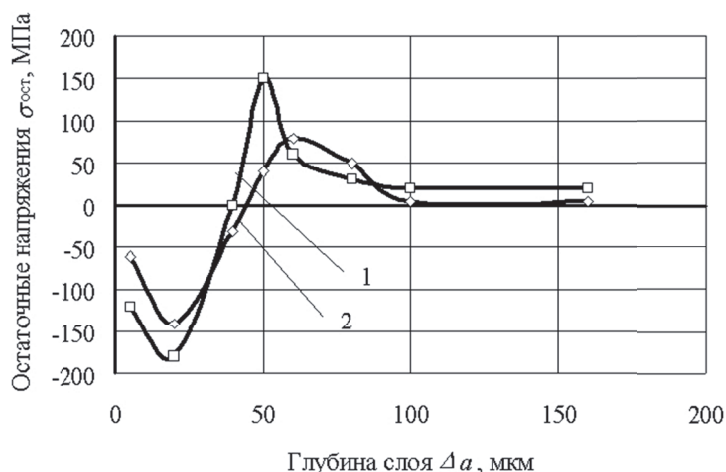


Рис. 2. Остаточные напряжения в исходных алитированных лопатках (толщина алитированного слоя $\Delta h \cong 45$ мкм):
1 - $h = 1,8$ мм, 2 - $h = 2,6$ мм

из лопаток, алитированных при $T=920^{\circ}\text{C}$ в течение $\tau = 4$ ч. Перед алитированием лопатки прошли термовакуумный отжиг при $T=1235 \pm 5^{\circ}\text{C}$, 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 $\sigma_0 = 150 - 250$ МПа. Колебания уровня замеренных напряжений связаны с масштабным фактором, - образцы имели различную толщину. В более глубоких слоях имеют место растягивающие остаточные напряжения.

На рис. 3 приведены эпюры остаточных напряжений в образцах, вырезанных из алитированных лопаток, предварительно термоупрочненных. Режим упрочнения $T=750^{\circ}\text{C}$, $P=0,5$. В этом случае остаточные напряжения достигают величины $\sigma_0 = -400$ МПа при значительной глубине их проникновения. При алитировании на

режиме $T=920^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4$ 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.

Что касается лопаток, упрочненных ТПУ при температурах выше, применяемых при алитировании, то на рабочем режиме в алити-

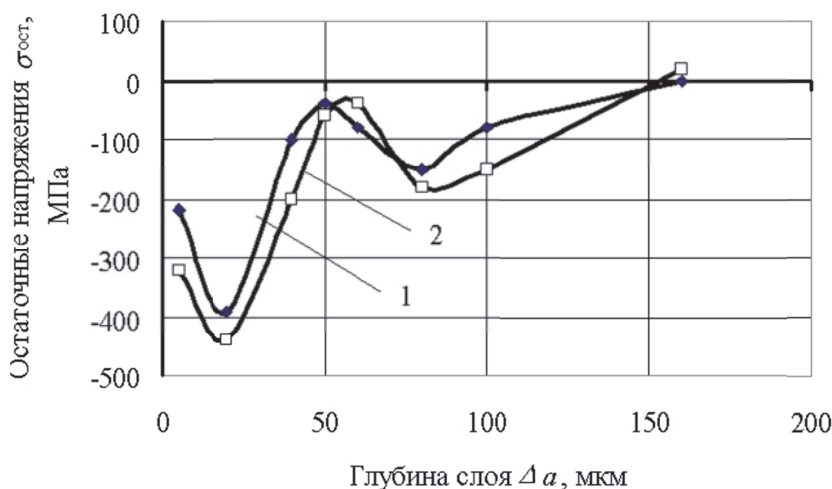


Рис. 3. Остаточные напряжения в лопатках, прошедших ТПУ до алитирования (толщина алитированного слоя $h = 45$ мкм):
1,2 - $h = 1,6...2,0$ мм

рованном 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 поверхностях. Если экстраполировать эти результаты на внутреннюю область охлаждаемых лопаток, то в силу наличия многих концентраторов, как это следует из расчетов, выполненных методом конечных элементов и приведенных в разд. 3, можно ожидать повышения уровня остаточных напряжений сжатия в местах резких переходов до величин $\sigma_0 = -(500-700)$ МПа.

Анализ результатов исследования показал, что лопатки упрочненные ТПУ имеют более

высокие эксплуатационные показатели, чем упрочненные по серийной технологии [4-7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скачков А.Н., Круцило В.Г., Лищинский Н.Я. Теплофизические особенности термопластического упрочнения деталей с покрытиями // В кн.: Теплофизика технологических процессов: Тезисы докладов VIII конференции, Рыбинск, 1992. С 65-66.
2. Скачков А.Н., Кравченко И.Б., Круцило В.Г., Лищинский Н.Я. Особенности формирования остаточных напряжений на деталях с покрытиями при термопластическом упрочнении // В кн.: Конструкционная прочность двигателей: Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции. Самара, 1991. С.51.
3. Беляев М.С., Жуков Н.Д., Кравченко М.П., Терехова В.В. Влияние алюминидных покрытий на усталость сплава ЖС6У // Проблемы прочности. - 1977. - №11. - С.34-38.
4. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Малащенко И.С. Циклическая прочность жаропрочных сплавов с покрытиями // Проблемы прочности. - 1988. - № 12 - С.30-35.
5. Ищенко И.И., Омельченко В.И., Синайский Б.Н. и др. Исследование влияния типовой термообработки и защитных покрытий на сопротивление усталости жаропрочного сплава ЖС6К // Проблемы прочности. - 1976. - № 8 - С.10-15.
6. Третьяченко Г.Н., Волошенко А.П., Гецов Л.Б., Зинченко Б.М. Термостойкость лопаток газовых турбин с защитными покрытиями // Проблемы прочности. - 1986. - № 5 - С.42-46.
7. Stand A., Land E. Effect of coatings on the mechanical properties of superalloys // High temperature alloys for gas turbines: Proc. Conf. (Liede, 4-6 oct. 1982). - Dordrecht, 1982. - P. 459-506.

THERMOPLASTIC STRENGTHENING OF ITEMS WITH HEAT-RESISTANT COATINGS

© 2020 V.G. Krutsilo, L.P. Sitkina, I.N. Razumova

Samara State Technical University

The article provides a scheme for the formation of residual stresses during thermoplastic hardening (TPU) of coated parts. The statement of the problem is explained as follows: study of the effects on heat resistance, creep, fatigue resistance of heat-resistant alloys, which leads to an improvement in the operational and strength characteristics of GTE parts. Determination of residual stresses in the surface layer of thermally hardened parts decided the selection of different hardening mechanisms for different temperature fields and compared with the temperature in homogeneous materials, which should be determined with heat-resistant coatings. When calculating the residual stresses in the elastic-plastic zone, the numerical method was used. Were manufactured by serial technology and subjected to thermoplastic hardening. Developed gamma targets for critical engine parts. The experimental results of studies of residual stresses at TPU are given. The research results showed that operational performance has higher operating performance than hardened by serial technology.

Keywords: metal hardening, heat-resistant coatings, residual stresses, fatigue, gas turbine engine.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-77-81

Vitaly Krutsilo, Ph.D., associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools.

E-mail: slp.samara@yandex.ru

Larisa Sitkina, Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools.

E-mail: slp.samara@yandex.ru

Irina Razumova, Assistant Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools.

E-mail: slp.samara@yandex.ru