

УДК 621.892

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОГО ФАКТОРА НА РЕЛАКСАЦИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ, ОБРАБОТАННЫХ ППД МИКРОШАРИКАМИ И ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ (ТПУ)

© 2011 И.Б. Кравченко, В.Н. Курицын

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 28.06.2011

Приведен анализ влияния термопластического упрочнения и упрочнения микрошариками на релаксацию остаточных напряжений.

Ключевые слова: релаксация, температурно – временной фактор, пластические деформации.

Одним из технологических методов повышения технических характеристик наиболее напряженных деталей газотурбинных двигателей - лопаток компрессора и турбины - является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Традиционно применяемые дробеструйные методы ППД лопаток ГТД, такие, как пневмодробеструйное упрочнение, гидродробеструйная обработка, пневмодинамическая обработка и ряд других, предусматривают использование в качестве рабочего тела стальных шариков и дроби диаметром от 0,5 до 3 мм. Указанные методы ППД нашли широкое распространение в авиационной промышленности, особенно в применении к деталям, работающим при умеренных температурах.

Поверхностное пластическое деформирование деталей, работающих в условиях повышенных и высоких температур, вышеуказанными методами оказывается в ряде случаев малоэффективными.

В последнее время разработан и внедрен новый метод ППД – упрочнение микрошариками, при котором остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое детали формируются при меньших степенях деформационного упрочнения, что дало возможность упрочнять детали, работающие в диапазоне температур до 750 °С.

Перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик деталей ГТД, работающих в условиях высоких температур, является метод термопластического упрочнения, обеспечивающий формирование благоприятного остаточного напряженного состояния в повер-

хностных слоях детали при минимальных величинах деформационного упрочнения. [3]

В отличие от ППД термопластическое упрочнение характеризуется весьма небольшой степенью упрочнения - относительные деформации не превосходят 1%. Традиционными методами не удается зафиксировать их изменение.

Интересные данные получены при исследовании релаксации остаточных напряжений, введенных термопластическим методом на круглых образцах из сплава ЖС6ФН [1].

В первой серии исследовалась релаксация остаточных напряжений в процессе, имитирующем изготовление лопаток. С этой целью образцы после операций термовакуумной обработки (ТВО), полирования и термопластического упрочнения были запаяны в трубки из стали ЭЯ1-Т (1Х18Н9Т) в атмосфере аргона, а затем подвергнуты ряду последовательных нагревов, имитирующих технологический процесс: образцы подвергались нагреву при $T = 920\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой $\tau = 7$ ч, охлаждению на воздухе (имитация алитирования), затем нагреву при $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой $\tau = 2$ ч, охлаждению на воздухе (диффузионный отжиг), нагреву при $T = 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$, с выдержкой $\tau = 15$ мин, охлаждению с печью до $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой $\tau = 2$ ч, охлаждению на воздухе (имитация пайки), термофиксации при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 30$ мин, старению при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 5$ ч. Проведение этих операций в среде аргона имело целью предотвратить возможные окислительные процессы поверхностного слоя. После того, как образцы были извлечены из трубок, определялись остаточные напряжения. Результаты этих опытов приведены на рис. 1.

На величину остаточных напряжений оказывает некоторое влияние последующий технологический процесс (наблюдаются явления релаксации). Происходит незначительное снижение остаточных напряжений. Тем не менее, несмот-

Кравченко Ирина Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика».

E-mail: kma-temp@mail.ru

Курицын Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

E-mail: kuritsin_vn@mail.ru

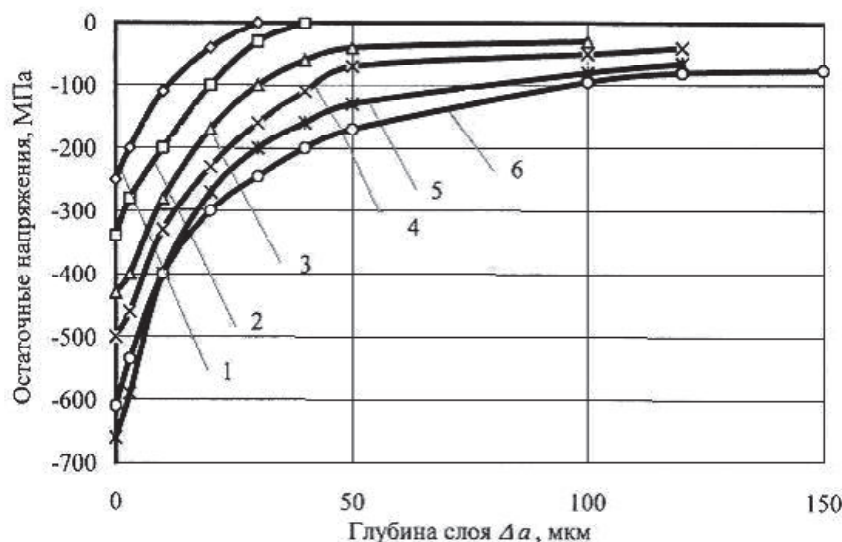


Рис. 1. Влияние температуры упрочнения на релаксацию остаточных напряжений (сплав ЖС6ФН, $\phi = 6,5$ мм): 1- $T=500^\circ\text{C}$, 2- $T=550^\circ\text{C}$, 3- $T=600^\circ\text{C}$, 4- $T=650^\circ\text{C}$, 5- $T=700^\circ\text{C}$, 6- $T=750^\circ\text{C}$

ря на релаксационные процессы за счет технологического процесса изготовления образцов, наведенные термопластическим способом остаточные напряжения сжатия сохраняются на относительно высоком уровне.

На рис. 2 приведен график изменчивости максимальных остаточных напряжений для различных времен выдержек. Уровень напряжений определялся для каждого времени выдержки на 3-х образцах. Как следует из этих данных, на образцах, термоупрочненных на режиме $T^\circ = 700^\circ\text{C}$, $P = 0,5$ МПа, для времени выдержки $\tau = 75 - 100$ ч релаксация остаточных напряжений находится на уровне 37%. Релаксационный процесс идет плавно без резких сбросов на первых часах выдержки.

Эксперименты по влиянию температурно-временных факторов на физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей после обработки микрошариками проводились в диапазоне температур, близких к эксплуатационным. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из сплава ЖС6ФН,

обработанных микрошариками, в зависимости от температуры и продолжительности нагрева, оценивалось по их максимальным значениям на поверхности. [2]

Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки микрошариками сплава ЖС6ФН в зависимости от температуры и продолжительности нагрева представлено на рис. 3,4,5,6,7.

Исследования показывают, что релаксация сжимающих остаточных напряжений в образцах из сплава ЖС6ФН при температуре 600°C незначительна и после нагрева в течение 2 часов составляет 2-3% от исходных значений величин остаточных напряжений на поверхности. Изотермический нагрев при этой температуре в течение 8 часов привел к снижению сжимающих остаточных напряжений на 12... 15%. Дальнейшее увеличение продолжительности изотермического нагрева характеризуется плавным снижением величины сжимающих остаточных напряжений по сравнению с изменением остаточных напряжений, которые происходят в первые 8 ча-

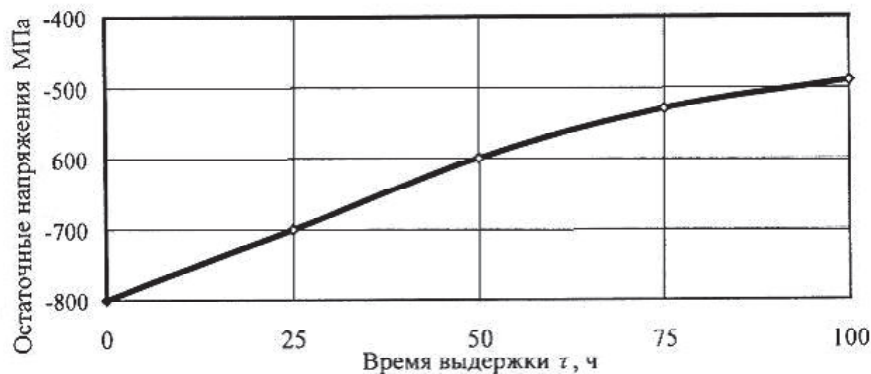


Рис. 2. Влияние времени на релаксацию остаточных напряжений. Сплав ЖС6ФН. $T = 950^\circ\text{C}$; $T_{\text{упр}} = 700^\circ\text{C}$; $P = 0,5$ МПа



Рис. 3. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС6ФН после обработки микрошариками в зависимости от времени выдержки при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – до нагрева; 2 – 2 ч; 3 – 8 ч; 4 – 25 ч; 5 – 50 ч; 6 – 100 ч

сов нагрева. После изотермической выдержки при температуре $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 25, 50 и 100 часов остаточные сжимающие напряжения на поверхности образца снизились соответственно на 18, 21 и 30%. После 100 часов изотермической выдержки при температуре $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ сжимающие остаточные напряжения на поверхности образца остались на уровне 670...680 МПа. С увеличением температуры закономерности изменения остаточных напряжений в зависимости от времени сохраняются. Так, при температуре изотермической выдержки $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ сжимающие остаточные напряжения за первые 8 часов релаксируют на 19...20% от исходной величины, дальнейшее снижение величины сжимающих остаточных напряжений происходит менее интенсивно. После 100 часов изотермической выдержки при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ сжимающие остаточные напряжения на поверхности образца остались на уровне 450...470 МПа.

Из приведенных графиков видно, что интенсивное снижение сжимающих остаточных напряжений наблюдается в течение первых 8 часов изотермических выдержек для всего рассматриваемого интервала температур.

На релаксацию остаточных напряжений в поверхностном слое существенное влияние оказывает также температура. Температура изотермического нагрева до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ незначительно сказывается на релаксацию остаточных напряжений исследуемого сплава (рис. 3).

При дальнейшем повышении температуры нагрева остаточные сжимающие напряжения уменьшаются более интенсивно (рис. 4, 5).

В интервале температур изотермического нагре-

ва от $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ при выдержке в течение 2 часов происходит резкое снижение величины остаточных напряжений до 70...60 МПа (рис 6, 7).

В этом интервале температур, когда наблюдается такое резкое изменение напряженно-деформированного состояния, при незначительных по времени выдержках, установление зависимости изменения напряжения от времени позволяет выявить преобладающее влияние одного из двух основных факторов – температуры и времени, влияющих на релаксацию остаточных напряжений. Из графиков (рис. 6, 7) видно, что интенсивное снижение сжимающих остаточных напряжений при температурах $900\text{--}950\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается также в первые 8 часов нагрева, после чего снижение сжимающих остаточных напряжений носит более плавный характер. Из этого следует, что температура имеет большее значение по сравнению с временем при релаксации остаточных напряжений.



Рис. 4. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС6ФН после обработки микрошариками в зависимости от времени выдержки: 1- 2 ч; 2 – 8 ч; 3 – 25 ч; 4 – 50 ч; 5 – 100 ч



Рис. 5. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС6ФН после обработки микрошариками в зависимости от времени выдержки при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 - 2 ч; 2 - 8 ч; 3 - 25 ч; 4-50 ч; 5-100 ч



Рис. 6. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС6ФН после обработки микрошариками в зависимости от времени выдержки при $T = 900^\circ\text{C}$: 1 - 2 ч; 2 - 8 ч; 3 - 25 ч

Теоретически считается, что остаточные напряжения в поверхностном слое будут уменьшаться при нагреве до значений напряжений, равных пределу текучести при рассматриваемых температурах. Для сплава ЖС6ФН предел текучести при температурах: $T = 800^\circ\text{C}$; $T = 900^\circ\text{C}$; $T = 1000^\circ\text{C}$ составляет соответственно 790... 835 МПа, 735...785 МПа, 392...432 МПа. В нашем случае не должно наблюдаться снижения остаточных напряжений до величин ниже значений σ_r для указанных температур. Экспериментальные данные показывают, что в действительности при этих температурах происходит уменьшение сжимающих остаточных напряжений до более низкого уровня. Очевидно, более интенсивному уменьшению сжимающих остаточных напряжений в данном случае способствуют диффузионные процессы, которые протекают в пластически деформированном поверхностном слое в десятки раз быстрее, чем в недеформированном.

Проведенные исследования показали, что с увеличением температуры и продолжительности нагрева характер эпюр остаточных напряже-

ний для деталей из сплава ЖС6ФН, обработанных ППД микрошариками, сохраняется, изменяются лишь количественные характеристики. В интервале температур $900..950^\circ\text{C}$ отмечено резкое уменьшение величины сжимающих остаточных напряжений, хотя при $T = 950^\circ\text{C}$ сжимающие остаточные напряжения в исследуемом температурно-временном диапазоне полностью не релаксируют и остаются на уровне 80...90 МПа. Максимальная интенсивность снижения величины сжимающих остаточных напряжений отмечается в первые 8 часов во всем исследуемом диапазоне температур.

Ниже приводятся данные исследований релаксации остаточных напряжений при ППД на примере упрочнения образцов микрошариками.

Образцы из сплава ЖС6Ф-Н для исследования изменчивости остаточных напряжений были упрочнены микрошариками ш 160 ... 200 мкм на оптимальном режиме: $n = 76 \text{ м/с}$, $\tau = 45 \text{ с}$.

Перед упрочнением образцы прошли термовакуумную обработку (ТВО). В дальнейшем в атмосфере аргона они были запаены в трубки из стали ЭЯ1-Т.

Исследования проводились при $T = 950^\circ\text{C}$. Остаточные напряжения определялись после $\tau = 2, 8, 25, 50, 100 \text{ ч}$ выдержки. Эпюры остаточных напряжений в поверхностных слоях упрочненных образцов в зависимости от различного времени выдержки при $T = 950^\circ\text{C}$ приведены на рис. 8. Как следует из этих данных, с увеличением времени наблюдается интенсивная релаксация остаточных напряжений.

После $\tau = 50 \text{ ч}$ остаточные напряжения почти полностью релаксируют.

На рис.9 в качестве иллюстрации приведены сравнительные графики изменчивости остаточных напряжений в зависимости от времени выдержки при $T = 950^\circ\text{C}$.

Из сопоставления приводимых данных можно сделать заключение, что при высоких температурах методы ППД практически не дают удовлетворительных результатов.

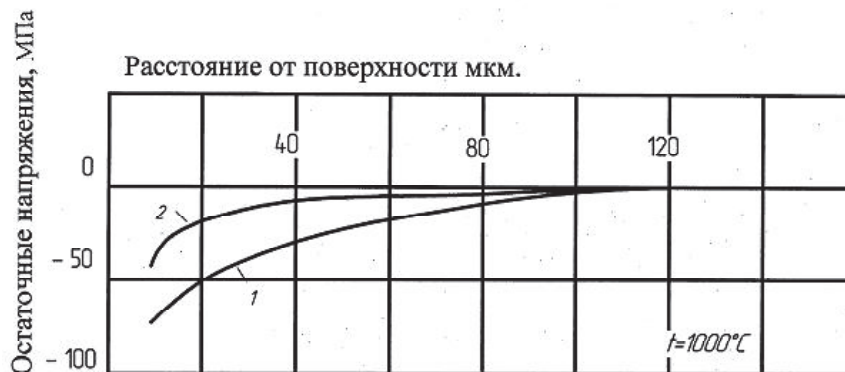


Рис. 7. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС6ФН после обработки микрошариками в зависимости от времени выдержки при $T = 1000^\circ\text{C}$: 1 - 2 ч; 2 - 8 ч

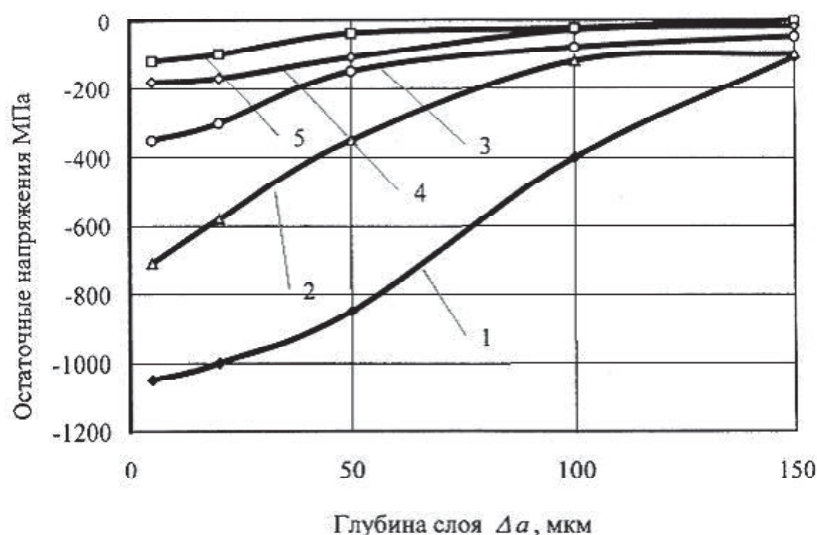


Рис. 8. Релаксация остаточных напряжений в поверхностном слое образцов (режим упрочнения: $V = 76$ м/с; $\tau = 45$ с; $\phi = 160...200$ мкм; $T = 950$ °С): 1 исходные; 2 – 2 ч; 3 – 8 ч; 4 – 25 ч; 5 – 50 ч

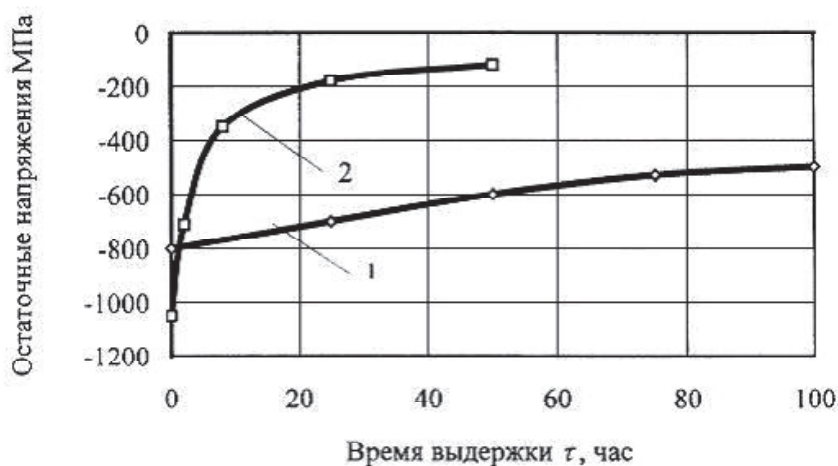


Рис. 9. Сравнительные графики изменения максимальных остаточных напряжений в зависимости от времени выдержки (сплав ЖС6ФН) 1 – ТПУ; $T_{исп} = 950$ °С; 2 – ППД микрошариками; $T_{исп} = 950$ °С

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко И.Б. Влияние качества поверхностного слоя на усталостные характеристики деталей. // Вестник Самарского государственного технического университета. Выпуск 21. Серия "Технические науки". 2004. С. 75-79.
2. Кравченко И.Б., Курицын В.Н. Современные методы упрочнения и их влияние на усталостные характеристики деталей газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. №1(2). С. 385-388.
3. Кравченко Б.А., Трофимов Н.Г., [и др.] Регулирование напряженного состояния внутренней полости охлаждаемых лопаток // Проблемы прочности. 1980. №11. С.63-67.

THE STUDY OF THE EFFECT OF THE TEMPERATURE – TIME FACTOR ON THE RELAXATION OF THE RESIDUAL AREAS IN DETAILS FROM THE HIGH – TEMPERATURE ALLOYS, TREATED WITH SURFACE – PLASTICALLY DEFORMED MICROSPHERES AND THERMOPLASTIC REINFARCMENT

© 2011 I.B. Kravchenko, V.N.Kuritsin

Samara State Technical University

The analysis of the effect of temperature and time on the relaxation of residual stresses after processing details with microspheres and thermoplastically reinforced.

Key words: relaxation, temperature – time factor, plastically deformed.

Irina Kravchenko, Candidate of Technics, Associate Professor at the Engineering Graphics Department.

E-mail: kma-temp@mail.ru

Vladimir Kuritsin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Mechanics Department. E-mail: kuritsin_vn@mail.ru