

УДК 621.751

ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ

© 2003 В. А. Барвинок¹, М. А. Вишняков²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²Самарский государственный технический университет

В статье представлены основные этапы расчета остаточных напряжений, возникающих при термопластическом упрочнении в деталях типа лопаток компрессора, а также результаты исследования влияния масштабного фактора на возможность формирования в их поверхностном слое благоприятного напряженного состояния. Установлено, что лопатки с толщиной профиля $h \geq 2$ мм легко упрочняются указанным методом. Для термоупрочнения тонких лопаток ($h = 0,5 \dots 1,5$ мм) предлагается дополнительно использовать специальную эластичную металлоемкость. Эффективность ее применения обосновывается результатами расчета остаточных напряжений.

В авиамоторостроении актуальной остается проблема повышения эксплуатационной надежности и ресурса двигателей, ответственные узлы и детали которых продолжительное время работают в условиях циклических нагрузок и повышенных температур. В настоящее время она решается путем создания новых современных конструкций, применения материалов с повышенными физико-механическими характеристиками, а также широкого внедрения в производство прогрессивных финишных методов обработки, среди которых особая роль отводится методам упрочняющей технологии, основанной на поверхностном пластическом деформировании (ППД). Методы ППД, к которым можно отнести обдувку микрошариками, пневмо- и гидродробеструйную обработки, алмазное выглаживание и другие, способствуют улучшению показателей качества обработанной поверхности.

Установлено, что в результате применения методов упрочняющей обработки на основе ППД в поверхностном слое создаются остаточные напряжения сжатия при соответствующей степени деформационного упрочнения. Многочисленные исследования, проведенные в этом направлении, подтвердили положительное влияние сжимающих напряжений и негативное воздействие повышенной степени упрочнения на усталостную прочность деталей, работающих в условиях высоких температур. В то же время, как из-

вестно, особенность методов ППД заключается в том, что формирование необходимого уровня сжимающих напряжений возможно только при значительных пластических деформациях. Отрицательное влияние последних связано с тем, что поверхностно-деформированный слой детали после упрочнения становится термодинамически неустойчивым, и в условиях рабочих температур интенсифицируются диффузионные процессы, которые являются причиной ускоренной релаксации созданного напряженного состояния. Поэтому использование ППД для деталей, работающих в указанных условиях, имеет свои ограничения. Отмеченные явления в большей степени сказываются на таких сложных и тяжело нагруженных деталях авиадвигателя, как лопатки турбины и компрессора. Наиболее оптимальными для них являются методы упрочнения, которые обеспечивают в поверхностном слое детали благоприятные сжимающие остаточные напряжения при минимальной степени упрочнения. Одним из таких методов является термопластическое упрочнение (ТПУ). В связи с этим особое значение приобретает задача обоснования возможности создания при ТПУ в поверхностном слое деталей типа лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) остаточных напряжений сжатия соответствующей величины и глубины залегания.

Известно, что причиной появления напряженно-деформированного состояния при

ТПУ является неравномерное температурное поле по толщине детали, которое образуется в процессе ее сквозного прогрева до температуры начала термопластических деформаций и последующего резкого охлаждения с боковых сторон. При анализе напряженной ситуации, возникающей в поверхностном слое, можно принять перо компрессорной лопатки, имеющей малую кривизну, за плоскую пластину. В этом случае для определения температурного поля $T(z, \tau)$, изменяющегося только по толщине пластины z за время τ , можно воспользоваться уравнением теплопроводности [1]

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

при следующих граничных и начальном условиях:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad (2)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} + \alpha(T) \cdot T|_{z=h} = 0; \quad (3)$$

$$T(0, z) = T_0.$$

Используя известные критерии $F_0 = \frac{a \cdot \tau}{h^2}$, $Bi(T) = \frac{\alpha(T) \cdot h}{\lambda}$ и обозначая

$$\xi = \frac{z}{h}, \text{ можно переписать уравнения (1) – (3)}$$

в безразмерном виде:

$$\frac{\partial T}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2}; \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0; \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} + Bi(T) \cdot T|_{\xi=1} = 0. \quad (6)$$

Для решения уравнений (4) – (6) применен численный метод – метод сеток, в основу которого положено уравнение в форме конечных разностей. Температура вычисляется в некоторых заранее выбранных точках пластины, а полученное температурное поле является основой для последующего расчета упругих и остаточных напряжений.

При определении упругих напряжений, возникающих в бесконечной пластине под воздействием температурного поля, принято считать, что поверхность этой пластины свободна от сил. В связи с тем, что температура изменяется только по толщине пластины, выражения для компонентов упругих напряжений имеют вид:

$$\sigma_x = \sigma_y = f(z),$$

$$\sigma_z = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0.$$

Взяв за основу отдельные известные положения, приведенные в работе [2], а также проведя соответствующие преобразования, можно получить выражение для определения упругих напряжений в пластине:

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{\alpha \cdot E}{1-\mu} \left[-T(z) + \frac{1}{2h} \int_{-h}^h T(z) \cdot dz + \frac{3z}{2h^3} \int_{-h}^h T(z) \cdot z \cdot dz \right],$$

где $\alpha(T)$ - коэффициент линейного расширения, $E(T)$ - модуль упругости материала, μ - коэффициент Пуассона.

На рис. 1 и 2 представлены графики изменения упругих напряжений для пластин из титанового сплава ВТ9 толщиной $h = 1...2$ мм при их одностороннем охлаждении. Режим термопластического упрочнения: температура нагрева $T = 900$ °С, давление охлаждающей жидкости $P = 0,6$ МПа. Видно, что при такой схеме пластические деформации появляются только в поверхностном слое пластин толщиной $h = 2$ мм, достигая своего максимального значения на поверхности. Их область распространения очень мала и ограничена точками, расположенными в непосредственной близости от охлаждаемой поверхности.

Для определения остаточных напряжений можно воспользоваться теоремой о раз-

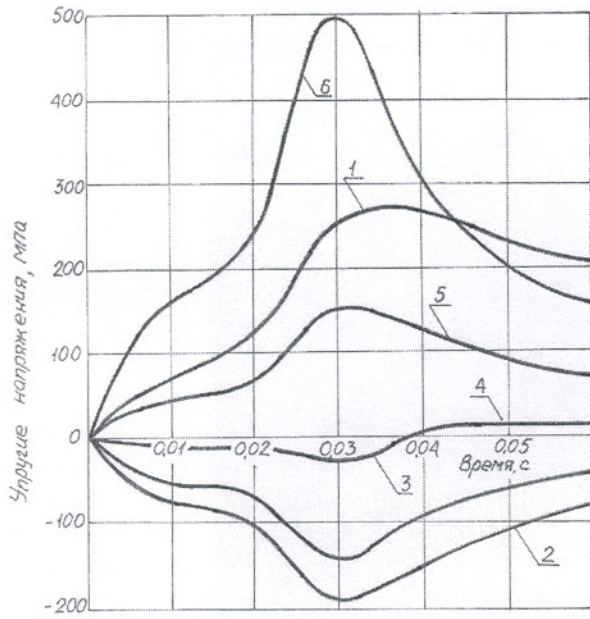


Рис. 1. Изменение упругих напряжений при ТПУ пластины толщиной $h = 1$ мм.
 1 - $z = 0$; 2 - $z = 0,6$ мм; 3 - $z = 0,7$ мм;
 4 - $z = 0,8$ мм; 5 - $z = 0,9$ мм; 6 - $z = 1,0$ мм
 (охлаждаемая поверхность)

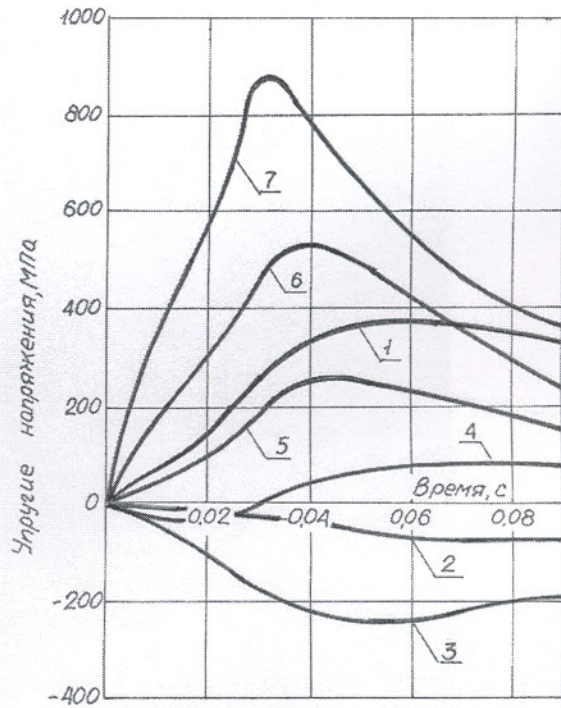


Рис. 2. Изменение упругих напряжений при ТПУ пластины толщиной $h = 2$ мм.
 1 - $z = 0$; 2 - $z = 0,6$ мм; 3 - $z = 1,0$ мм;
 4 - $z = 1,68$ мм; 5 - $z = 1,8$ мм; 6 - $z = 1,92$ мм;
 7 - $z = 2,0$ мм (охлаждаемая поверхность)

грузке [3], согласно которой остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости материала:

$$\sigma_0(z) = \sigma(z) - \sigma^*(z), \quad (7)$$

где $\sigma(z)$ - напряжения в упругопластическом материале, $\sigma^*(z)$ - напряжения, возникающие при предположении об идеальной упругости материала.

Остаточные напряжения, вычисляемые по формуле (7), являются неуравновешенными и перераспределяются вследствие деформации пластины. Уравновешенные остаточные напряжения при одностороннем охлаждении определяются из выражения

$$\sigma_0 = -S_0(z) + \frac{1}{2h} \int_{-h}^h S_0(z) \cdot dz + \frac{3z}{2h^3} \int_{-h}^h S_0(z) \cdot z \cdot dz,$$

где функция

$$S_0(z) = -\sigma_0(z) = \sigma_{упр}(z) - \sigma_{упр-пл}(z)$$

введена для удобства расчетов.

Результаты расчета остаточных напряжений в пластинах из титанового сплава ВТ9 приведены на рис. 3. Видно, что только начиная с толщины $h = 2$ мм, в поверхностном слое образуются сжимающие остаточные напряжения, максимальная величина которых на поверхности составляет $\sigma_{0_{max}} = 80$ МПа. Увеличение толщины до 5 мм приводит к возрастанию величины остаточных напряжений ($\sigma_{0_{max}} = 400$ МПа) и толщины пластически деформированного слоя.

Практика эксплуатации газотурбинных двигателей свидетельствует о том, что дефекты, наблюдаемые на лопатках компрессора, обычно зарождаются в непосредственной близости от их кромок, толщина которых составляет $h = 0,5 \dots 1,5$ мм. Поэтому в процессе ТПУ особенно важно создать равномерное поле сжимающих остаточных напряжений не

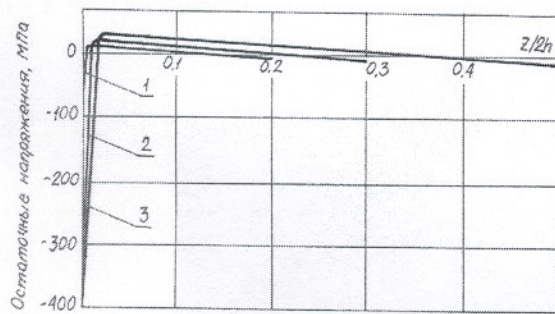


Рис. 3. Изменение остаточных напряжений.
1 - $h = 2$ мм; 2 - $h = 3$ мм; 3 - $h = 5$ мм

только по перу лопатки, но и в поверхностном слое их тонких кромок. Одним из путей достижения поставленной задачи является применение специальной дополнительной массы (накладки), закрепляемой в тех местах лопатки, где ее толщина не превышает 2 мм. В качестве такой массы использованы шарики из жаропрочного сплава ЖС6У размером 100...200 мкм, которые засыпались в специальную эластичную металлоемкость. Последняя устанавливалась на перо лопатки со стороны неохлаждаемой поверхности. Достаточно хороший тепловой контакт создавался плотным прижатием накладки с шариками к детали.

Для подтверждения возможности создания в поверхностном слое тонкой пластины необходимого уровня остаточных напряжений с соответствующей глубиной залегания был проведен расчет теплонапряженного состояния, возникающего в ней при термопластическом упрочнении. С этой целью реальная система «деталь-накладка» была представлена в виде двух контактирующих пластин с идеальным тепловым контактом между ними. Дифференциальные уравнения теплопроводности, граничные и начальные условия для рассматриваемой системы будут иметь вид:

$$\frac{1}{a_0} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad h_0 < z < 0, \quad (8)$$

$$\frac{1}{a_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad 0 < z < h, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h_0} = 0, \quad (10)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} + \alpha(T) \cdot T \Big|_{z=h} = 0, \quad (11)$$

$$\lambda_0 \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-0} = \lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=+0}, \quad (12)$$

$$T(0, z) = T_0, \quad (13)$$

где a_0 и a_1 - коэффициенты температуропроводности дисперсной среды и материала пластины, λ_0 и λ_1 - коэффициенты их теплопроводности, h_0 и h - толщины накладки и пластины, τ и l - шаги по времени и пространству (в направлении z), m и n - количество шагов в пространстве соответственно для накладки и пластины.

Решение системы уравнений (8) – (13) представляет собой температурное поле $T(z)$ в системе «деталь-накладка», которое является основой для дальнейшего расчета упругих и остаточных напряжений.

При использовании специальной дополнительной массы в виде накладки, закрепляемой на противоположной от охлаждаемой поверхности стороне пластины, расчет напряженного состояния необходимо производить с учетом ее несвободного состояния. В отличие от свободной пластины, в которой температурные деформации придают ей изогнутую форму, пластины с накладкой, закрепленной по ее краям, не подвергаются изгибу, а только частично удлиняются в зависимости от сил трения на контактирующих поверхностях. В связи с этим для расчета упругих напряжений в пластине с учетом их двумерности можно предложить следующую формулу:

$$\sigma_{упр} = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \left[T_\varphi - T(z) \right], \quad (14)$$

где $T_\varphi = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h T(z) \cdot dz$ - среднеинтегральная температура по сечению детали.

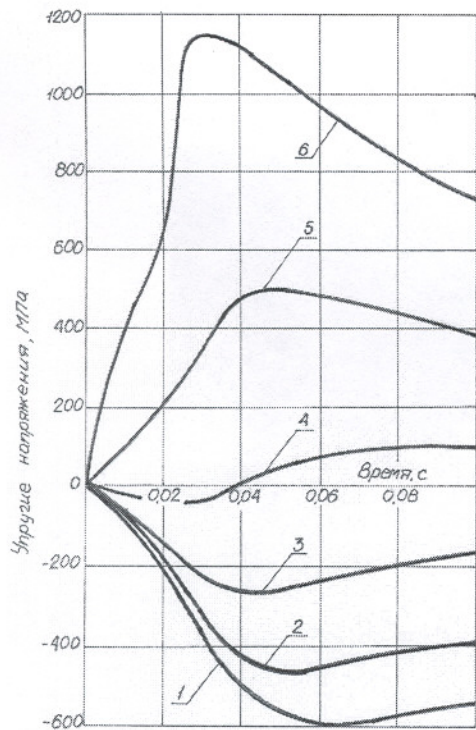


Рис. 4. Упругие напряжения при ТПУ пластины толщиной $h = 1$ мм с применением накладки.
 1 - $z = 0$; 2 - $z = 0,2$ мм; 3 - $z = 0,4$ мм; 4 - $z = 0,6$ мм;
 5 - $z = 0,8$ мм; 6 - $z = 1,0$ мм

Результаты расчета по формуле (14) упругих напряжений, возникающих в пластине толщиной $h = 1,0$ мм (рис. 4), показывают, что в отличие от термопластического упрочнения свободной пластины толщиной $h = 1,0$ мм (рис. 1) применение накладки позволило создать в поверхностном слое тонкой пластины пластические деформации со значительной глубиной залегания.

Расчет остаточных напряжений в деталях при термопластическом упрочнении с использованием дополнительной массы выполнен по формуле

$$\sigma_0 = -S_0(z) + \frac{1}{2h} \int_{-h/2}^{h/2} S_0(z) \cdot dz + \frac{12z}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} S_0(z) \cdot z \cdot dz$$

Результаты этого расчета для пластин толщиной $h = 0,5...1,5$ мм показаны на рис. 5. Видно, что в поверхностном слое сформировались сжимающие остаточные напряжения, максимальная величина которых рас-

полагается на поверхности и составляет $\sigma_{0_{max}} = 50...420$ МПа. На величину напряжений и глубину их распространения существенное влияние оказывает толщина упрочняемой детали. Особенно это сказывается при ее изменении от 0,5 до 1,0 мм.

Приведенные в статье результаты расчетов свидетельствуют о том, что метод термопластического упрочнения, рекомендуемый для повышения усталостной прочности деталей типа лопаток компрессора, позволяет сформировать в их поверхностном слое благоприятную эпюру сжимающих остаточных напряжений. При этом увеличение толщины упрочняемой детали вызывает соответствующий рост величины и глубины залегания напряжений. Кроме того, установлено, что при термоупрочнении деталей толщиной менее 2 мм для получения необходимого эффекта упрочнения с противоположной от охлаждаемой поверхности стороны детали должна быть закреплена специальная дополнительная масса.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964. – 517 с.
3. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. – 231 с.

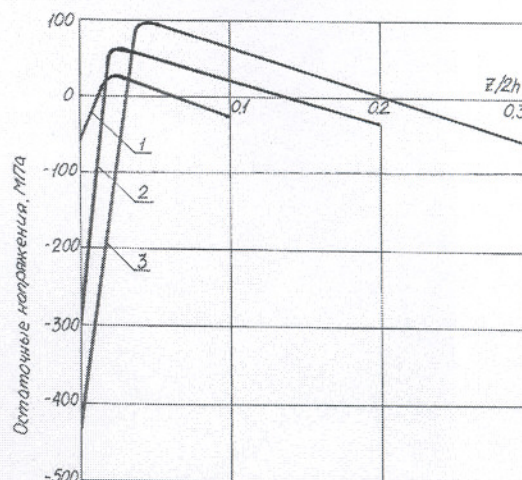


Рис. 5. Остаточные напряжения при ТПУ пластины с применением накладки.
 1 - $h = 0,5$ мм; 2 - $h = 1,0$ мм; 3 - $h = 1,5$ мм

INFLUENCE OF SCALE FACTOR ON THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN CASE OF THERMOPLASTIC STRENGTHENING

© 2003 V. A. Barvinok, M. A. Vishnyakov

Samara State Aerospace University
Samara State Technical University

The paper presents the main stages of calculating residual stresses developing during thermoplastic strengthening in parts like compressor blades. It also shows the results of investigating scale factor influence on the possibility of developing favorable stressed state in their surface layer. It has been found that blades with profile thickness $h \geq 2$ mm are easily strengthened in the above mentioned way. For thermal strengthening of thin blades ($h = 0,5 \dots 1,5$ mm) we suggest using additionally a special elastic metal tank. The efficiency of its use is justified by the results of residual stress calculating.