

УДК 621.892

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ЗНАЧЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО ПРОГИБА ОБРАЗЦА, ПОДВЕРГНУТОГО ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОМУ УПРОЧНЕНИЮ

© 2018 В.Г. Круцило, Н.И. Дедов, М.В. Якимов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

В статье приведены методики определения остаточных напряжений: расчетная, экспериментальная методом травления и с использованием образцов-свидетелей.

Ключевые слова: остаточные напряжения, термопластическое упрочнение, образцы-свидетели, прогибы образцов.

Представленные в статье материалы получены в рамках выполнения гранта РФФИ № 17-48-630694 «Разработка физической модели механизма термопластического упрочнения материалов, работающих в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок».

ВВЕДЕНИЕ

Термопластическое упрочнение (ТПУ) используется при изготовлении ответственных деталей, работающих при повышенных температурах и знакопеременных нагрузках, типа лопаток и дисков турбин газотурбинных двигателей (ГТД). За счет формирования в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений с большой их глубиной залегания при минимальных пластических деформациях повышается надежность и долговечность упрочненных деталей. Подробно процесс ТПУ описан в работе [1]. Схематично технология ТПУ представлена на рис. 1.

Для реализации технологии ТПУ были разработаны установки и способы упрочнения, которые защищены патентами [2-7]. Различные аспекты технологии ТПУ описаны в работах [11-15].

ОБСУЖДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Критерием качества упрочнения является соответствие параметров эпюры остаточных напряжений указанным в технических условиях. В первую очередь максимальные по абсолютной величине сжимающие остаточные напряжения $\sigma_{ост\ max}$ и глубина активной части эпюры h_n . Эти параметры можно определить различными методами:

- расчетным;
- экспериментальным;

- с использованием образцов-свидетелей.

Расчетный метод подробно изложен в работе [8]. Он основан на технологических параметрах процесса ТПУ: температуре нагрева θ , времени выдержки при этой температуре τ и давлении охлаждающей жидкости p .

Кроме технологических параметров не менее важными являются химический состав, физико-механические и теплофизические свойства материала упрочняемой детали. Все теоретические и экспериментальные исследования были проведены на деталях и образцах из сплава ЭИ893. Свойства этого сплава приведены в таблицах 1-3.

Из таблиц видно, что физико-механические свойства значительно зависят от температуры нагрева, что необходимо учитывать в расчетах.

На рис. 2 приведены эпюры остаточных напряжений, рассчитанные при различных, приближенных к реальным, условиях. Основные параметры выбирались:

- постоянными при $T=20$ °С;
- средние в интервале температур $T=20 \div 700$ °С;
- с учетом влияния температуры.

На рис. 2 нанесена также эпюра остаточных напряжений, полученных опытным путем [8].

Сопоставление позволяет сделать заключение, что наилучшее приближение к опытной эпюре остаточных напряжений наблюдается в том случае, если при расчетах учитывается влияние температуры на физико-технологические параметры.

Экспериментальные исследования проводились по методике Давиденкова Н.Н. [9] с уточнениями Биргера И.А. [10]. Образцы для исследований вырезались из натуральных лопаток (рис. 3) и плит определенной толщины.

Круцило Виталий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».

Дедов Николай Иванович, кандидат технических наук, профессор. E-mail: mech_kaf@samgtu.ru

Якимов Михаил Владимирович, ассистент.



Рис. 1. Блок-схема технологического процесса термопластического упрочнения детали

Таблица 1. Марочный химический состав, %

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>B</i>	<i>Ce</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
не более									по расчету		не более	
0,08	0,5	0,5	15-17	Основная	8-10	4-5	1,2-1,6	1,2-1,6	0,010	0,025	-	-

Таблица 2. Нормы механических свойств при 20 °С сортового материала

Обработка	Температура испытания, °С	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$a_H, \frac{кгс \cdot м}{см^2}$
		кгс / мм ²		%		
		не менее				
1180 °С, 2 ч, воздух;	20	90	60	15	20	7
800 °С, 12 ч, воздух	750	55	-	8	12	-

Определение остаточных напряжений методом травления имеет свои особенности, которые описаны ниже.

Установка для определения прогибов состоит из корпуса 1, на котором смонтированы все основные узлы приспособления (рис. 4).

Узел 2 для крепления исследуемого образца 3, имеющий способность перемещаться по направляющему корпусу 1 в зависимости от длины образца, узел 4 для крепления балочки 5, позволяющий задавать начальный прогиб балочки ($f=1,0$ мм), необходимый для постоянного контакта ее с образцом. Балочка представляет собой упругую стальную пластинку толщиной 0,3 мм, с обеих сторон которой прикреплены тен-

зодатчики, являющиеся активным сопротивлением, меняющимся в процессе деформации балочки (образца). Она выполняет роль одного из двух плеч мостовой схемы сопротивлений (T_1, T_4) (Рис. 3.2), другим плечом которой (T_2, T_3) является система сопротивлений регистрирующего прибора (например, КСП-4, ЭПП-09М). Таким образом, датчик-мост состоит из четырех тензодатчиков T_1-T_4 , потенциометра R , служащего для балансировки моста, и блока питания Б.

Этот метод достаточно широко апробирован и его достоверность не вызывает сомнений. Однако он имеет существенные недостатки: разрушение изделия, трудоемкость процесса, опасность из-за использования сильнодействующих кислот.

Таблица 3. Физические свойства сплава

Удельный вес, $\rho / \text{см}^3$	8,794							
Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}, \text{кгс} / \text{мм}^2$	20 °C		750 °C			800 °C		
	2,23		1,74			1,65		
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$	20 – 100 °C				20 – 750 °C			
	11,3				14,4			
Теплопроводность, $\text{кал} / \text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$	20 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
	0,030	0,031	0,033	0,037	0,041	0,048	0,056	0,065
Электропроводность $\cdot 10^4, \text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	
	0,716	0,711	0,705	0,700	0,700	0,707	0,718	

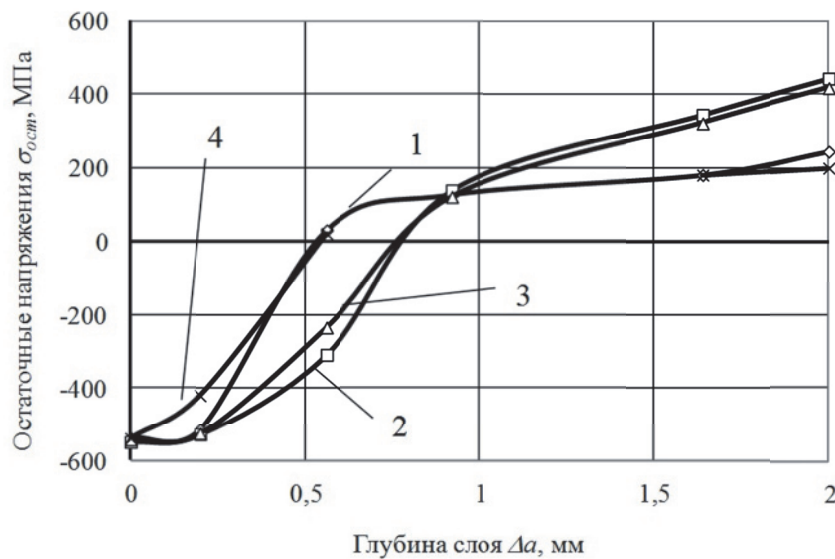


Рис. 2. Остаточные напряжения после ТПУ (материал ЭИ893; $T_{\text{упр}} = 700 \text{ °C}$):
1 – расчет; $\lambda = \lambda(T)$; $C=C(T)$; 2 – расчет; $\lambda = \lambda_{20 \text{ °C}}$; $C=C_{20 \text{ °C}}$; 3 – расчет; $\lambda = \lambda_{m0}$; $C=C_m$; 4 – эксперимент



Рис. 3. Разметка профильной части лопатки

Метод с использованием образцов-свидетелей позволяет для исследований остаточных напряжений не разрушать упрочняемые натурные детали. Так как эпюры остаточных напряжений при термопластическом упрочнении весьма ти-

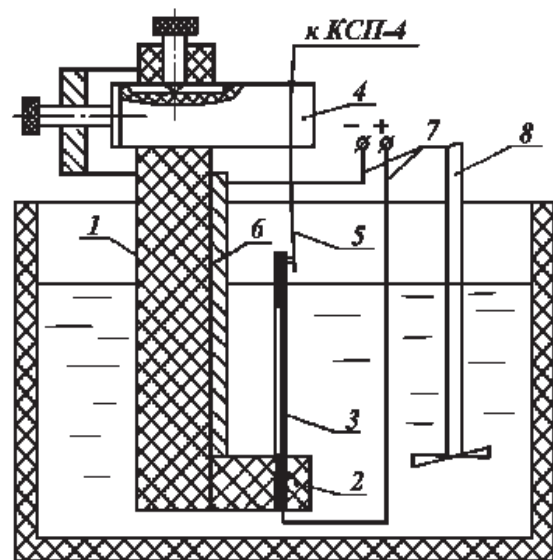


Рис. 4. Схема установки для определения остаточных напряжений на призматических образцах

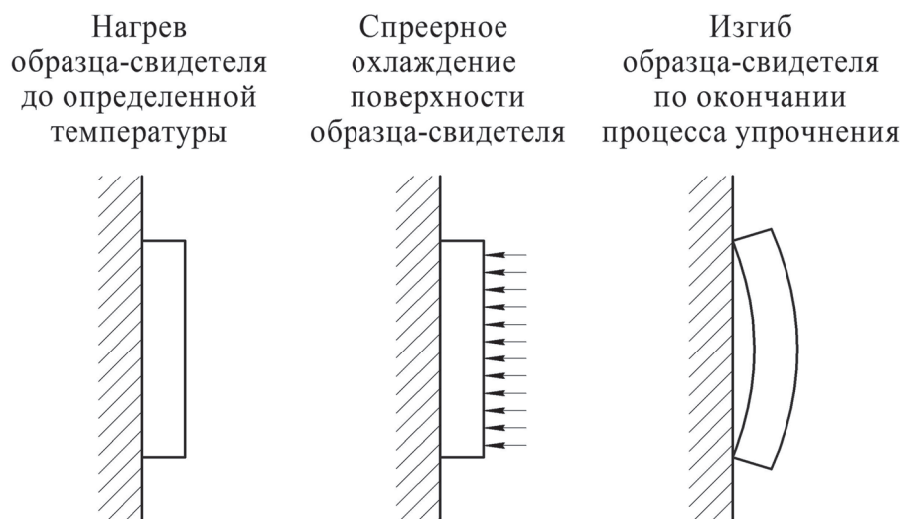


Рис. 5. Схема технологического процесса упрочнения образцов-свидетелей

пичны [11], то параметры этих эпюр можно рассчитать по прогибу образцов-свидетелей после упрочнения.

На рис. 5 показана схема использования образцов-свидетелей при термопластическом упрочнении.

На рис. 6 приведены эпюры распределения остаточных напряжений экспериментально полученные методом Н. Н. Давиденкова и аппроксимированные двумя вариантами. Остаточные напряжения по толщине образца самоуравновешенные.

Значения экспериментальных величин, используемых при проверке корректности методики приведены в таблице 4.

Ниже приводится методика расчета эпюры остаточных напряжений по прогибам образцов-свидетелей при различных аппроксимациях эпюр. Для проверки данной методики используются конкретные данные экспериментов.

Изгибающий момент в поперечном сечении образца соответствующий остаточным напряжениям определяется интегральным выражением, которое в данном случае разбивается на два интеграла

$$M = b \int_0^{h_y} \sigma_y y dy + b \int_0^{h-h_y} \sigma y dy,$$

где σ_y – функция напряжения на участке упрочнения, σ – функция напряжения на упругом участке.

Рассмотрим прямоугольную и треугольную формы аппроксимации экспериментально построенного профиля остаточных напряжений в упрочненном слое.

Из условия самоуравновешенности напряжений определим наибольшие остаточные напряжения по формулам:

$$\sigma_{pmax} = \frac{2\sigma_{max}h}{h-h_y} = \frac{2 \cdot 600 \cdot 2}{2-0.6} = 514.28 \text{ МПа}$$

для прямоугольного профиля,

$$\sigma_{pmax} = \frac{\sigma_{max}h_y}{h-h_y} = \frac{600 \cdot 0.6}{2-0.6} = 257.14 \text{ МПа}$$

для треугольного профиля.

Самоуравновешенной системе остаточных напряжений соответствует напряженное состояние чистого изгиба. Изгибающие моменты в

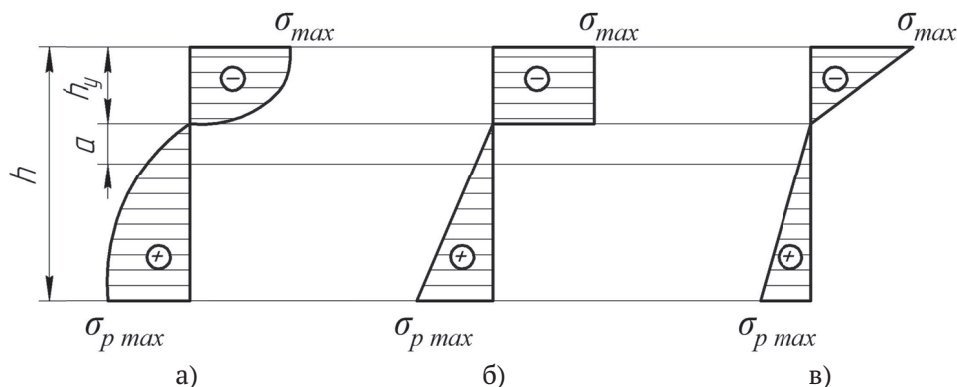


Рис. 6. Эпюры остаточных напряжений по толщине образца после ТПУ: а) экспериментальный профиль, б) прямоугольный профиль, в) треугольный профиль

Таблица 4. Значения экспериментальных величин

Наименование величины	Значение
Температура нагрева θ , °C	720
Время выдержки τ , мин.	10
Давление охлаждающей жидкости p , МПа	0,5
Максимальные остаточные сжимающие напряжения σ_{max} , МПа	600
Максимальные остаточные растягивающие напряжения σ_{pmax} , МПа (для прямоугольного профиля)	514,28
Максимальные остаточные растягивающие напряжения σ_{pmax} , МПа (для треугольного профиля)	257,14
Толщина образца h , мм	2
Толщина упрочненного слоя h_y , мм	0.6
Ширина образца b , мм	10
Длина образца l , мм	100
Модуль упругости материала E , МПа	$2 \cdot 10^5$

сечении образца определяем по формулам:

$$M = \frac{1}{6} \sigma_{max} b h_y (4h - h_y) =$$

$$= \frac{1}{6} 600 \cdot 10 \cdot 0.6 (4 \cdot 2 - 0.6) = 4440 \text{ Нмм}$$

для прямоугольного профиля,

$$M = \frac{1}{3} \sigma_{max} b h h_y = \frac{1}{3} 600 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 0.6 = 2400 \text{ Нмм}$$

для треугольного профиля.

Образцы, обработанные по методу термопластического упрочнения, имеют выпуклость со стороны обработанной поверхности.

Для определения остаточного прогиба образца после термопластического упрочнения прием балочную схему с учетом симметрии рис. 7. Для моделирования чистого изгиба консольную балку нагружаем изгибающим моментом, соответствующим остаточным напряжениям.

Прогиб свободного конца консольной балки определяем по формуле:

$$y = \frac{Ml^2}{EJ_z} = \frac{4.44 \cdot 0.05^2}{2 \cdot 10^{11} \cdot 9.867 \cdot 10^{-12}} = 2.81 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

для прямоугольного профиля,

$$y = \frac{Ml^2}{EJ_z} = \frac{2.4 \cdot 0.05^2}{2 \cdot 10^{11} \cdot 9.867 \cdot 10^{-12}} = 1.52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

для треугольного профиля.

Для определения осевого момента инерции поперечного сечения образца нейтральную линию при изгибе принимаем совпадающей границей термопластического упрочнения (рис. 2).

Осевого момента инерции определяем по формуле

$$J_z = \frac{bh^3}{12} + a^2bh = \frac{10 \cdot 2^3}{12} + 0.4^2 \cdot 10 \cdot 2 = 9.867 \text{ мм}^4$$

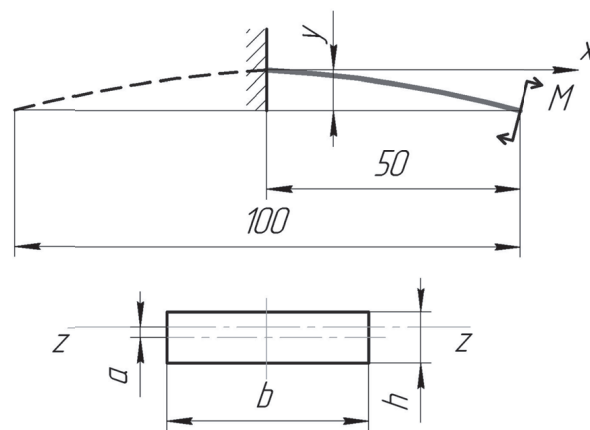


Рис. 7. Расчетная схема образца для определения прогиба и его поперечное сечение

где $a=0.4\text{мм}$ – смещение нейтральной оси сечения относительно оси симметрии.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов расчетов по данной методике показывает преимущество аппроксимации по варианту б (рис. 6). Погрешность данных, полученных при использовании данного метода, по сравнению с экспериментальными σ_{max} и σ_u не превышает 10 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко Б.А., Круцило В.Г., Гутман Г.Н. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин: Монография / Самара: СамГТУ, 2000. 216 с.
2. Патент РФ №2171857, 13.11.2000 Способ восстановления циклической прочности деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на основе никеля // Патент России № 2171857, 2000 / Кравченко Б.А., Россеев Н.И., Забродин Ю.В.,

- Круцило В.Г., Медведев С.Д., Монахов А.В.
3. Патент РФ №2170272, 26.06.2000 Установка для термопластического упрочнения лопаток // Патент России №2170272, 2000 / Кравченко Б.А., Круцило В.Г., Медведев С.Д., Монахов А.В. Россеев Н.И.
 4. Патент РФ №2351660, 26.02.2006 Способ термопластического упрочнения деталей и установка для его осуществления // Патент России №2351660, 2006 / Круцило В.Г.
 5. Патент РФ №2331674, 10.08.2006 Способ термопластического упрочнения сварных соединений // Патент России №2331674, 2006 / Круцило В.Г.
 6. Патент РФ №2258086, 17.12.2003 Способ термопластического упрочнения деталей и установка для его осуществления // Патент России №2258086, 2003 / Круцило В.Г.
 7. Патент РФ №2249878, 07.09.2009 Способ обработки деталей // Патент России №2249878, 2009 / Круцило В.Г.
 8. Круцило В.Г., Ситкина Л.П., Разумова И.Н. Исследование остаточных напряжений при термопластическом упрочнении // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции, Самара: СамГТУ, 2017. С. 99-102.
 9. Давиденков Н.Н. Измерение остаточных напряжений в трубах // Журн. техн. физики. 1931. Т. 1. Вып. 1.
 10. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232.
 11. Круцило В.Г. Кротинов Н.Б., Карпов А.В. Формирование устойчивого напряженно-деформированного состояния поверхностной упрочняющей обработкой и прогнозирование процесса его изменения // Упрочнение, технологии и покрытия. М.: Машиностроение, 2007. № 8, С. 27-32
 12. Круцило В.Г. Термопластическое упрочнение крупногабаритных деталей // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 2001, С. 167-168.
 13. Круцило В.Г. Связь износа и повреждения лопаток турбин газоперекачивающих агрегатов с усталостной прочностью // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т.13. № 4(3). С. 1083-1084.
 14. Круцило В.Г. Проектирование новой конструкции камеры охлаждения для установки термопластического упрочнения и экспериментальные сравнения эффективности упрочнения образцов из сплава ХН77ТЮР в кольцевом спреере и в новой конструкции камеры охлаждения // Упрочняющие технологии покрытия, 2011. №5. С. 44-47.
 15. Кравченко И.Б., Курицын В.Н. Исследование влияния температурно-временного фактора на релаксацию остаточных напряжений деталей из жаропрочных сплавов, обработанных ППД микрошариками и термопластическим упрочнением (ТПУ) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т.13. № 6. С. 194-198.

DETERMINE THE MAGNITUDE OF RESIDUAL STRESSES VALUE OF THE RESIDUAL TROUGH SAMPLES SUBJECTED TO THERMOPLASTIC HARDENING

© 2018 V.G. Krucilo, N.I. Dedov, M.V. Yakimov

Samara State Technical University

In the article the methods of determination of residual stresses are given: calculated, experimental, etching and using specimen-witnesses.

Keywords: residual stresses, thermoplastic hardening, specimen-witnesses, deflections of samples.