

УДК 629.735

С.А. БУКАТЫЙ

Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П.А. Соловьева Рыбинск, Россия

ЭФФЕКТ НЕЛИНЕЙНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ДЕТАЛЕЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД

В работе изложено теоретическое и экспериментальное обоснование эффекта нелинейности температурных характеристик для материалов с внутренними напряжениями I, II и III рода и рассмотрено его применение для создания неразрушающего метода контроля внутренних остаточных напряжений и на его основе метода прогнозирования размерной стабильности материалов и деталей. Рассматриваются в качестве примеров перспективы использования эффекта для создания методов совершенствования различных технологических процессов изготовления ответственных деталей ГТД с целью повышения их точности и размерной стабильности.

Ключевые слова: эффект нелинейности температурных характеристик, остаточные напряжения I, II и III рода, метод контроля, размерная стабильность, технологические остаточные деформации, совершенствование технологических процессов.

Введение

Общеизвестна роль внутренних — остаточных напряжений (ОН) в обеспечении надежности и долговечности ответственных деталей ГТД. Условно ОН делят на напряжения I, II и III рода. Все эти напряжения связаны между собой и являются следствием искажений кристаллической решетки материала. Несмотря на то, что доля энергии, приходящейся на ОН II и III рода превышает 99%, на практике до сих пор учитывают только ОН I рода. Материал с внутренними напряжениями II и III становится термодинамически неустойчивым и его переход в более стабильное состояние с меньшей свободной энергией сопровождается изменением физико-механических свойств и перераспределением ОН. Это приводит к размерной нестабильности, т.е. к изменению размеров и формы деталей во времени — технологическим остаточным деформациям (ТОД), а также к изменению работоспособности деталей. Перераспределение ОН происходит и при механической обработке и удалении технологического припуска с поверхности заготовки. Это также приводит к значительным ТОД, часто превышающим технологические допуски. Поэтому контроль внутренних напряжений и прогнозирование размерной стабильности материалов и деталей неразрушающими методами является важной проблемой в машиностроении.

Эффект нелинейности температурных характеристик материалов и деталей

Большие возможности в решении указанной выше проблемы предоставляет эффект

нелинейности температурных характеристик материалов (ЭНТХ), установленный нами на основании теоретических и экспериментальных исследований в РГАТУ. Физические основы и экспериментальное обоснование эффекта изложены в работах [1] и [2]. Эффект заключается в существенном влиянии статических искажений ξ_c кристаллической решетки на динамические искажения $\xi_T(t)$ (рис. 1). ЭНТХ проявляется в необратимости процесса температурного расширения материалов в области малых воздействий, изменении величин модуля упругости $E \sim dF/dr$, температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) α и плотности ρ материала, нелинейности температурных зависимостей α , α_E и α_ρ , а также в различии их величин при нагревании и охлаждении.

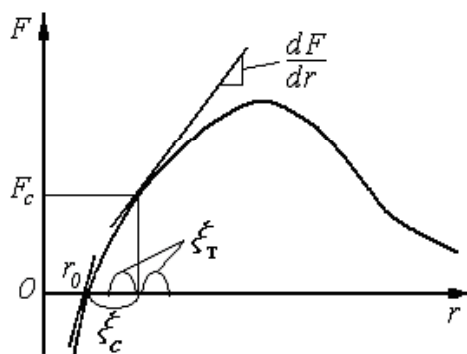


Рис. 1. Схема сил F межатомного взаимодействия в двухатомной модели Френкеля

Как следствие получена важная зависимость произведения

$$E\alpha = E_0\alpha_0 = \text{const}, \quad (1)$$

где E_0 и α_0 – модуль упругости и ТКЛР материала в исходном (например, в отожженном) состоянии без ОН.

Эта зависимость используется для определения температурных напряжений в деталях и подобно зависимости $\alpha/C_p = \text{const}$ тоже не зависит от температуры.

Экспериментальная часть

Динамические искажения $\bar{\xi}_T(t)$ проявляются в зависимости α от температуры, которую обозначим как $K_\alpha = d\alpha/dt$. В соответствии со справочными данными для большинства конструкционных материалов в отожженном состоянии в интервале от 0 до 200–500 °С эта

зависимость близка к линейной и имеет порядок 10^{-9} – 10^{-8} К⁻². Эксперименты на образцах из стали 40Х и сплава АК4-1 показывают (табл. 1), что ОН, появляющиеся в деталях в процессе изготовления, приводят к значительному увеличению экспериментально определяемой на специальном оборудовании [3] средней величины K_{cp} . Аналогичные результаты были получены на сплаве ВД 17. Величина K_{cp} является более чувствительной по сравнению с E и характеристикой состояния материала. Поэтому K_{cp} может служить параметром для неразрушающего контроля ОН и прогнозирования стабильности свойств материалов, а также целевой функцией при решении задач оптимизации различных технологических процессов (ТП) изготовления высокоточных деталей.

Ниже приведены примеры использования ЭНТХ для совершенствования различных ТП изготовления деталей ГТД.

Таблица 1

Результаты экспериментов на образцах из стали 40Х и сплава АК4-1

Материал	ст.40Х			АК4-1		
	Исходное состояние	Пласт.деф. $\epsilon = 1\%$	Закалка $t = 800$ °С	Исходное состояние	Пласт.деф. $\epsilon = 0,5\%$	Закалка $t = 450$ °С
E , МПа	193900	200400	189100	72200	75400	73700
$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	12,6	11,9	13,2	23,7	23,1	24,8
$K_{cp} \cdot 10^8$, К ⁻²	6,2	7,5	13,1	19,3	22,5	65,8
$K_\alpha \cdot 10^8$, К ⁻²	0,7			1,0		
E_α , МПаК ⁻¹	244,3	238,5	249,6	171,1	174,9	182,7

Примеры использования ЭНТХ

1. Неразрушающий контроль остаточных напряжений в заготовках и прогнозирование размерной стабильности деталей

В процессе изготовления компрессорных лопаток часто наблюдается при механической обработке неисправимый брак по технологическим остаточным деформациям (ТОД) как из алюминиевых, так и из титановых сплавов. Данный метод контроля как неразрушающий был апробирован на образцах, размеры которых не превышали базовую длину контролируемых датчиков – до 100 мм. При исследовании крупногабаритных деталей потребуются датчики с большей базой, либо придется вырезать из деталей образцы.

Результаты измерений образцов из 72 заготовок лопаток 1–3 ступеней компрессора ГТД из ВД17 и 21 заготовки лопаток из ВТЗ-1, представленные в табл.2, показывают, что средний уровень $K_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{cp_i}$ для комплектов с

повышенными ТОД приблизительно в 8 раз больше K_{cp} для комплектов с пониженными ТОД и намного превышают величины K . Отметим, что результаты контроля заготовок из различных комплектов с повышенными ТОД

показали большое рассеяние величин \bar{K}_{cp} от $18 \cdot 10^{-8}$ до $589 \cdot 10^{-8}$ К⁻². Это свидетельствует о неоднородности остаточного напряженного состояния материала заготовок в состоянии поставки.

Таблица 2

Результаты контроля заготовок лопаток из сплавов ВД17 и ВТЗ-1

Материал	K_α 10 ⁻⁸ К ⁻²	K_{cp} 10 ⁻⁸ К ⁻²	Средний % брака
ВД17	0,6	28,1	>50
		3,6 11,3	10 100 (после фрез. + шлиф.)
ВТЗ-1	0,3	8,5 1,1	50 10

2. Совершенствование и оптимизация технологических процессов с целью уменьшения остаточных напряжений и технологических деформаций и повышения размерной стабильности материалов и деталей

Известно, что наибольшее влияние на точность размеров и формы деталей оказывают ОН, распределенные по всему объему. Чаще всего они возникают при литье, штамповке и др. заготовительных процессах, связанных с нагревом и охлаждением. Для уменьшения ОН наряду с совершенствованием конструкции изделий требуется обеспечение оптимальных режимов охлаждения. Если ТП не позволяет обеспечить требуемые условия охлаждения, то образующиеся ОН напряжения в заготовках перед механической обработкой нужно устранять. На практике для этой цели чаще всего применяют термические методы. Экспериментально установлено [2], что при снятии остаточных напряжений изменение α и K_{cp} происходит тем больше, чем больше их исходные значения. При этом K_{cp} изменяется в большей степени, чем α . Поскольку трудно подобрать партию экспериментальных образцов или деталей с одинаковыми исходными характеристиками, то для определения искомых параметров следует использовать критерий $\Delta K_{cp} / K_{cp}^{исх}$. Для решения оптимизационных технологических задач указанный критерий следует использовать в качестве целевой функции. В зависимости от поставленной задачи – определение параметров ТП, обеспечивающих максимальное снятие ОН или наведение в материале в процессе обработки минимальных ОН следует стремиться к максимальным или нулевым значениям критерия. Отметим, что, несмотря на относительно низкую чувствительность, аналогичные результаты дает и критерий $\Delta\alpha / \Delta\alpha_{исх}$.

Для совершенствования заготовительных технологических процессов с целью обеспечения минимального уровня остаточных напряжений в объеме заготовок в качестве целевой функции нужно использовать величину $K_{cp} \rightarrow \min$. Данный подход был использован для снятия остаточных напряжений в заготовках лопаток компрессора виброударным методом [4], поскольку термические методы оказались не эффективными.

3. Исследование и оптимизация процесса изотермической штамповки заготовок лопаток ГТД из сплава ВТ3-1

Практика показывает, что часто детали из сплава ВТ3-1 после изготовления в процессе хранения в первые дни претерпевают значительные деформации. С целью повышения размерной стабильности материала лопаток ис-

следовали процесс изотермической штамповки заготовок длиной до 120 мм. На основании анализа и предварительных экспериментов были выявлены пять основных параметров, оказывающих наибольшее влияние на качество лопаток. Эти параметры, пределы их изменения и кодовые обозначения представлены в табл. 3.

Таблица 3
Контролируемые параметры процесса изотермической штамповки заготовок лопаток из ВТ3-1

Наименование контролируемых параметров	Обозначение и единицы измерения		Пределы изменения параметров	
			min	max
Длительность отжига		мин	15	45
Температура нагрева под калибровку	T_H	°C	800	930
Температура термостата	T_T	°C	450	700
Скорость охлаждения лопатки после отжига	V	К/мин	60	220
Температура калибровки	T_K	°C	800	930

Неполную квадратичную модель технологического процесса строили на основе дробного факторного эксперимента 2^{5-2} . В качестве критерия оптимизации использовалась величина K_{cp} . После проверки на адекватность была получена следующая зависимость (2):

$$K_{cp} = 10^{-8} \cdot (347 - 2.3596 \cdot \tau - 0.43097 \cdot T_H - 0.5298 \cdot T_T + 0.0341 \cdot V + 0.0272 \cdot T_K + 0.00289 \cdot \tau \cdot T_H + 0.0006129 \cdot T_H \cdot T_T) \quad (2)$$

Расчеты показали значение $K_{cp} = 7,6 \cdot 10^{-8}$, K^{-8} при $K_{\alpha} = 0,3 \cdot 10^{-8}$, K^{-8} , что свидетельствует о неоптимальности ТП. Поиск параметров, соответствующих $K_{cp} \rightarrow \min$, осуществлялся методом наибольших градиентов. В результате были получены следующие оптимальные значения: $\tau = 25$ мин, $T_H = 930$ °C, $T_T = 450$ °C, $V = 60$ К/мин, $T_K = 800$ °C. По опытной технологии было изготовлено 16 лопаток, характеристики которых сравнивали с характеристиками контрольных лопаток, изготовленных по серийной технологии. В силу технологических особенностей при реализации опытного техпроцесса было принято $T_T = 480$ °C. Опытным режимом соответствует значение $K_{cp} = 2,5 \cdot 10^{-8}$, K^{-8} , т.е.

в 3 раза меньше по сравнению с серийным режимом. При этом отклонения механических свойств (незначительно увеличился предел прочности, остальные характеристики остались на прежнем уровне) и микроструктуры материала лопаток были в пределах допуска.

Исследование размерной стабильности лопаток осуществлялось на электронно-измерительной машине «INSPECTOR» с точностью 0,002 мм. Лопатки фиксировались по двум точкам в замковой части и одной точке в концевой части пера. Это позволило исследовать наибольшие деформации прогиба в середине пера лопатки и разворот концевых поперечных сечений. Измерения проводили последовательно в течение одиннадцати суток после изготовления (штамповки) заготовок. Результаты измерений, показанные на рис. 2, подтверждают экспоненциальный закон изменения деформаций лопаток во времени и свидетельствуют об уменьшении ТОД (прогибов – а) и углов разворота – б) поперечных сечений) опытных лопаток по сравнению с контрольными в 3 раза.

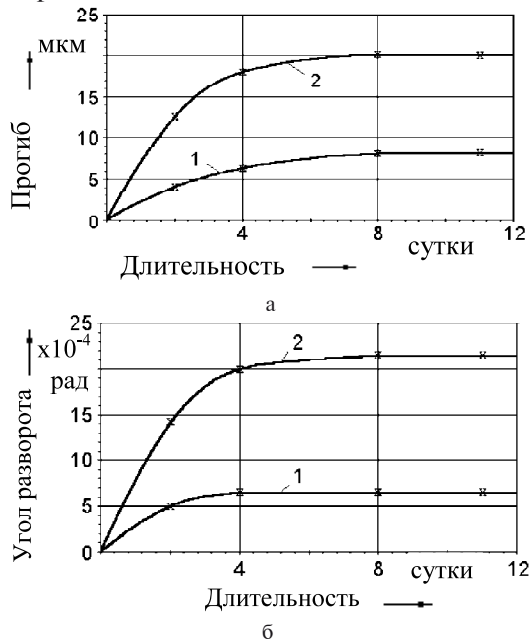


Рис. 2. Деформации лопаток во времени после изготовления изотермической штамповкой
 а – изменение прогибов лопаток;
 б – изменение углов закрутки лопаток;
 1 – опытные и 2 – контрольные лопатки

4. Оценка повреждаемости и прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса деталей

Экспериментальные исследования на образцах из сплава ЖС-6К показали, что после закалки при $t = 120^\circ\text{C}$ критерий $K_{\text{ср}}$ изменяется с $0,15 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ до $0,37 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$. Пластическая деформация растяжением до 0,5% также уве-

личивает $K_{\text{ср}}$ с $0,18 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ до $0,43 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$. Результаты термоциклических испытаний образцов на режиме $\sigma = 650 \text{ МПа}$, $t_{\text{max}} = 800^\circ\text{C}$ показывают (таблица 4), что с увеличением числа циклов величина $K_{\text{ср}}$ растет.

Таблица 4
 Результаты экспериментов на образцах из сплава ЖС-6К

Количество циклов n, шт.	25	125	225
Изменение критерия $K_{\text{ср}} \cdot 10^{-8}, \text{ K}^{-8}$	1,1	3,5	5,3

Исследования резонансных частот колебаний шести неохлаждаемых турбинных лопаток длиной 229 мм в зависимости от наработки также показали перспективность использования в качестве критерия повреждаемости температурного коэффициента частоты (ТКЧ) α_f (таблица 5).

Таблица 5
 Результаты исследований ТКЧ лопаток турбины ГТД

Длительность наработки N, час	0	215	1147	1282
Величина ТКЧ $\alpha_f, \text{ ГцК}^{-1}$	0,18 0,19	0,32 0,35	0,30	0,48

Следовательно, методы контроля, основанные на ЭНТХ, можно использовать не только для оценки состояния и стабильности свойств материала, но и для контроля повреждаемости и прогнозирования ресурса, оценки ремонтпригодности или качества ремонта ответственных деталей.

Заключение

Приведенные выше результаты исследований показывают большие возможности и эффективность применения ЭНТХ в производстве ответственных деталей ГТД.

Наряду с изложенным значительный интерес представляют перспективные направления применения ЭНТХ в авиационном производстве:

1. Разработка неразрушающих методов и оборудования для контроля: повреждаемости лопаток ГТД, их остаточного ресурса и ремонтпригодности; стабильности физико-механических свойств жаропрочных металлов и сплавов при рабочих температурах.

2. Совершенствование технологии и повышение качества деталей при литье и термической обработке.

3. Разработка методик оптимизации процессов сварки с целью уменьшения ОН в сварных швах и замены болтовых соединений сваркой.

4. Разработка специального оборудования и методик определения режимов виброударной обработки для снятия ОН в заготовках ответственных деталей, сварочных швах с целью уменьшения ТОД деталей в процессе их изготовления, а также повышения их усталостной прочности.

5. Совершенствование технологии изготовления крупногабаритных заготовок и деталей из алюминиевых и титановых сплавов с целью уменьшения ТОД при изготовлении, а также повышения стабильности физико-механических свойств материалов и размерной стабильности деталей ГТД в процессе их эксплуатации.

6. Исследование процессов механической обработки деталей резанием.

На основе ЭНТХ разработаны и получены а.с. на способ определения степени неупругости материала, способ определения внутренних напряжений в материалах, способ настройки технологического процесса и способ контроля качества стабилизации размеров деталей.

Литература

1. Неразрушающий контроль внутренних напряжений и размерной стабильности мате-

риала лопаток ГТД [Текст]: Букатый С.А. // *Авиационная промышленность*. –1989. –№4. –С. 21–22.

2. Физические основы неразрушающего метода прогнозирования стабильности размеров и формы деталей и его применение для совершенствования технологических процессов [Текст]: Букатый С.А. // *Вестник Верхневолжского отд. Академии технологических наук РФ. Сер. Высокие технологии в машиностроении и приборостроении*. Вып.2.: Сб. научн. тр./ Рыбинская государственная авиационная технологическая академия.- Рыбинск, –1995. –152 с. –С. 51-57.

3. Система контроля стабильности размеров материалов и деталей [Текст]: Букатый С.А. // *Датчики и системы*. –2001. –№ 11(30). –С. 41–44.

4. Стабилизация размеров и формы деталей ГТД виброударным методом [Текст]: Букатый С.А.// *Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д.Кузнецова*. Доклады. Часть1. Самара.–2001.–С. 47-50.

Поступила в редакцию 17.06.2014

S.A. Bukatyi. Effect of nonlinear temperature characteristics materials and parts and perspectives of its application in manufacture of parts of gas turbine engines

This paper sets forth theoretical and experimental basis of the effect of nonlinear temperature characteristics for materials with residual stresses of types I, II, and III (herein the «Effect»); and examines the Effect's application in creating a non-destructive method of control of residual stresses and, based thereon, method for prognosing dimensional consistency of materials and parts. As examples, this paper examines perspectives of use of the Effect to refine various technological processes involved in the production of key parts of the Gas Turbine Engines aimed at increasing their accuracy and dimensional consistency.

Key words: *Effect of nonlinear temperature characteristics; residual stresses of types I, II, and III; control method; dimensional consistency; technological residual deformations; refinement of technological processes.*