

X-Ray Structure Analysis Technique for Stress-and-Strain State Analysis of Compressor Blades Made of VT3-1 Alloy

N. A. Yablokova

The article shows ways of using X-ray diffraction technique for the stress-and-strain state analysis of compressor blades surface made of titanium alloy VT3-1. The Dolle-Hauk method is used for stress components calculating on the compressor blade surface. This method, in comparison with traditional methods, enables to get additional criteria for quality assessment of compressor blades surface and their operational life.



АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ СПЛАВА ВТЗ-1 ПО РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫМ ДАННЫМ

Современное производство новых и ремонт газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного и наземного применения не представляется возможным без анализа и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей ГТД. Для оценки и обеспечения надежной работоспособности ГТД в целом большое значение имеет анализ напряжений и деформаций в наиболее нагруженных и ответственных деталях — на лопатках и дисках ГТД. Исследование НДС проводится на поверхностях деталей в зонах концентраторов напряжений — это замки, полки, кромки лопаток, межпазовые выступы дисков и т. д.

Одной из наиболее важных задач при исследовании НДС рабочих лопаток компрессоров является возможность экспериментального определения напряжений в опасных зонах концентраторов напряжений без разрушения лопатки.

Наиболее эффективным мероприятием для повышения ресурса лопаток компрессоров из титановых сплавов является введение упрочнения поверхности лопаток в зонах концентрации напряжений дробеструйной обработкой, виброгалтовкой и т. д.

Оптимальный уровень остаточных напряжений, обеспечивающий повышение

ресурса лопаток компрессоров из сплава ВТЗ-1, составляет около 0,6–0,8 % от величины предела текучести материала.

На лопатках компрессоров из титановых сплавов после финишной обработки поверхности необходимо стремиться к получению однородного напряженного состояния приповерхностных слоев в зонах концентраторов напряжений с минимальными анизотропными свойствами. Чем меньше неоднородность величины остаточных напряжений сжатия по разным направлениям измерения, тем выше эксплуатационные свойства лопатки компрессоров.

Специфическое влияние поверхности на сопротивление усталости заключается не только в наличии шероховатостей и технологических концентраторов напряжений, но и в том, что пластическое деформирование металла начинается на поверхности раньше, чем в сердцевине. Поэтому применение методов дифракции рентгеновского излучения для исследования НДС поверхностных слоев в производстве ГТД является наиболее эффективным.

Исследование параметров напряженного состояния поверхностных слоев лопаток неразрушающими методами позволяет определить не только реальное техническое состояние поверхностных слоев лопатки, но позволяет также управлять технологическими процессами их изготовления и ремонта.

Целью работы является анализ НДС на лопатках компрессоров ГТД из сплава ВТЗ-1 с использованием неразрушающих методов дифракции рентгеновского излучения.

Основные понятия и формулы

На основе теории упругости для изотропного кристаллического материала

формула для определения деформаций кристаллической решетки $\varepsilon_{\varphi\psi}$ в направлении φ (азимутальный угол) и ψ имеет следующий вид [1–3]:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = (d_{\varphi\psi} - d_0) = \frac{1}{2} S_{2\{hki\}} (\sigma_{\varphi\psi} - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \frac{1}{2} S_{2\{hki\}} \sigma_{33} + S_{1\{hki\}} \text{Tr}(\sigma) + \frac{1}{2} S_{2\{hki\}} \tau_{\psi} \sin(2\psi), \quad (1)$$

где $\sigma_{\varphi} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin(2\varphi) + \sigma_{22} \sin^2 \varphi$;

$\tau_{\varphi} = \tau_{13} \cos \varphi + \tau_{23} \sin(2\varphi)$;

$\text{Tr}(\sigma) = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$;

ψ — угол между нормальными к поверхности образца и к отражающей плоскости $\{hki\}$;

d_0 и $d_{\varphi\psi}$ — межплоскостные расстояния кристаллической решетки для недеформированного и деформированного материала;

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ ($\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$) — нормальные (касательные) компоненты тензора напряжений;

σ_{φ} (τ_{φ}) — нормальное (касательное) напряжение в направлении измерения φ ;

$\frac{1}{2} S_2 = (1 + \nu)/E$ и $S_1 = -\nu/E$ — рентгеновские постоянные упругости.

Для упрощения методики анализа параметров напряжений составляющую σ_{33} можно принять равной нулю, поскольку в большинстве реальных ситуаций ее значение мало и находится в пределах величины погрешности измерений.

Тензор напряжений определялся методом Долле–Хаука (Dölle–Hauk) [4, 5]. Параметры деформации кристаллической решетки этим методом рассчитывались по следующим формулам:

$$a_1 = (d_{\psi+} + d_{\psi-})/2 = d_0 + \frac{1}{2} S_{2\{hki\}} d_0 \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi; \quad (2a)$$

$$a_2 = (d_{\psi+} - d_{\psi-}) = \frac{1}{2} S_{2\{hki\}} d_0 \tau_{\varphi} \sin(2\psi) \quad (2b)$$

Оба параметра a_1 и a_2 описываются линейной функцией, что не требует использования сложных математических вычислений.



Яблокова Наталья Александровна

Ведущий инженер управления главного металлурга ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск, к. т. н.

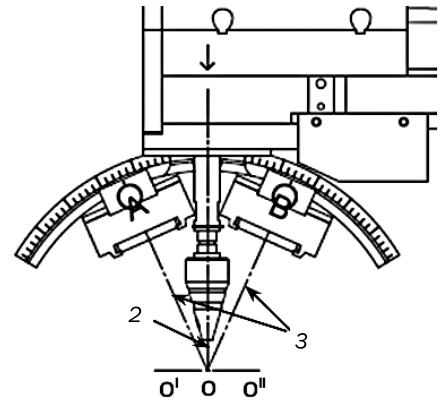
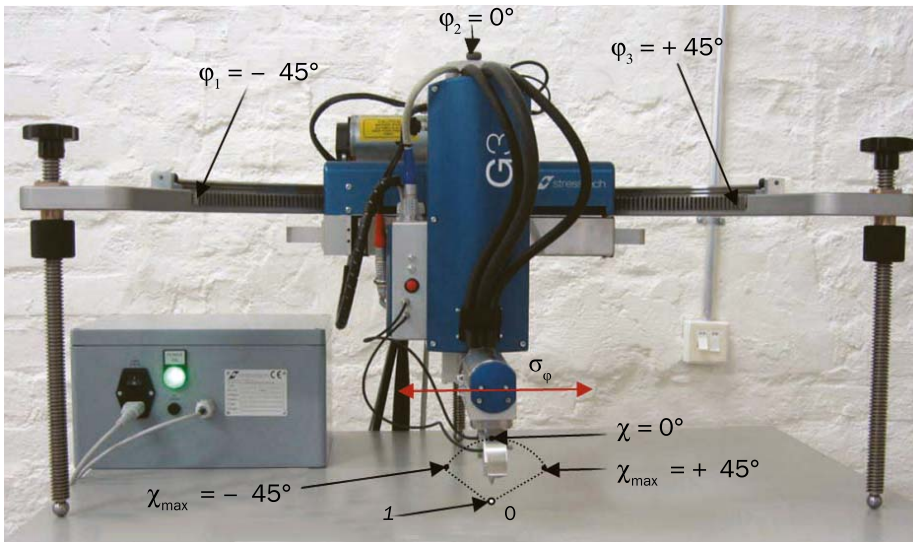


Рис. 1. Измерение напряжений σ_φ с помощью дифрактометра Xstress 3000 G3R с χ -модифицированным гониометром: 1 — пятно облучения; 2, 3 — падающий и отраженный потоки рентгеновского излучения

Оборудование и условия проведения эксперимента

Для анализа напряженного состояния лопаток компрессоров применялся специализированный дифрактометр (рентгеновский анализатор напряжений) Xstress 3000 G3R с χ -модифицированным гониометром (рис. 1). В этом дифрактометре вместо углов ψ , используемых в традиционном методе $\sin 2\psi$, используются углы вращения χ [6]. χ — это угол вращения плоскости, содержащей падающий и отраженные лучи (плоскость гониометра), вокруг оси углового смещения $O'O''$, расположенной в плоскости образца. В этой оптической схеме образец неподвижен, поэтому нет ограничений по его размерам.

Использовались следующие режимы рентгено съемки: K_α -излучение Ti; фаза α -Ti, отражающая плоскость (11.0), напряжение 30 кВ, ток 6 мА, дуга гониометра 50 мм, диаметр коллиматора 2 мм, положительный наклон $\chi_+ = (0 \div 40)^\circ$ и отрицательный наклон $\chi_- = (0 \div 40)^\circ$; осцилляции $\Delta\chi = \pm 4^\circ$; количество наклонов χ : $N_{\chi_+} = 7$ и $N_{\chi_-} = 7$. Для обработки экспериментального спектра использовалась функция подгонки Пирсона VII и параболическая функция вычитания фона.

При использовании метода Долле-Хаука угловое смещение χ в положительную (χ_+) и отрицательную (χ_-) стороны должно иметь одинаковое абсолютное значение.

Исследуемые детали и условия обработки поверхности

В работе исследовались поверхности лопаток после полирования и упрочнения стальными шариками диаметром 2–4 мм на станке ВГМ-4.

Определение составляющих напряжений σ_φ на поверхности лопатки проводи-

Таблица. Результаты расчета тензора напряжений на лопатке компрессора, МПа

точка измерения	Область измерения	
	Спинка	Корыто
точка 1 выходная кромка	$\begin{pmatrix} -46_6 & -1_1 & 5 \\ -1_1 & -44_4 & 1_7 \\ 5 & 1_7 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -44_0 & 11_5 & -2_2 \\ 11_5 & -25_8 & -4_4 \\ -2_2 & -4_4 & 0 \end{pmatrix}$
точка 2 (входная кромка)	$\begin{pmatrix} -50_4 & 9 & -1_5 \\ 9 & -49_3 & 5 \\ -1_5 & 5 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -48_6 & -6_2 & -2_2 \\ -6_2 & -47_8 & 1_9 \\ -2_2 & 1_9 & 0 \end{pmatrix}$
точка 3 (зона перехода от пера к замку лопатки)	$\begin{pmatrix} -49_6 & 2 & 2_5 \\ -2 & -50_2 & 1_4 \\ 2_5 & 1_4 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -43_7 & 12_4 & 0 \\ 12_4 & -34_8 & 5 \\ 0 & 5 & 0 \end{pmatrix}$

лось в трех точках (рис. 2) в направлении измерения $\varphi = 0, 45$ и 90° .

Результаты

На рис. 3 показаны типичный рентгеновский спектр, записанный на лопатке с использованием K_α -излучения титана, и пример расчета параметров деформаций методом Долле-Хаука.

Как видно из рис. 3б, экспериментальные точки на графике описываются линейной зависимостью для функций $a_1 = f(\sin 2\chi)$ и $a_2 = f(\sin 2\chi)$. Для остальных точек измерения получились аналогичные зависимости.

Результаты расчета компонентов тензора напряжений на поверхности лопатки компрессора методом Долле-Хаука представлены в таблице. На пера лопатки со стороны спинки нормальные компоненты тензора напряжений оказались практически одинаковыми по величине, величина касательных (сдвиговых) компонентов напряжений незначительна, что характеризует плоское напряженное состояние на спинке лопатки, действующее после упрочнения лопаток.

На выходной кромке пера лопатки (в точке 1) со стороны корыта компонен-

тов тензора напряжений σ_{12} составляет значительную величину, и выявлены анизотропные свойства. Такое напряженное состояние характерно для механической обработки поверхности полированием.

На корыте лопатки определены касательные напряжения, значительные по величине. Наличие касательных напряжений характерно для механической обработки поверхности, которое обычно не является критерием дефектности материала. Наличие касательных напряжений в материале объясняется тем, что нарушается параллельность атомных плоскостей в анализируемых приповерхностных слоях. Величина касательных напряжений также зависит от выбора координатной системы измерения.

Учитывая, что в процессе эксплуатации лопатки максимальное накопление повреждаемости материала из-за усталости происходит именно в исследованных нами зонах, изучение и установление критериев оценки ресурса на основе анализа НДС поверхностных слоев лопатки после различных видов обработки позволит создать наиболее технологичные и эффективные способы обработки поверхности.



Рис. 2. Схема измерения составляющих напряжений на лопатке компрессора

Выводы

1. Следует особо отметить, что при определении НДС лопатки компрессора из сплава ВТЗ-1 необходимо учитывать анизотропию свойств, которая оказалась существенной на данном материале, и возможное различие по величине и характеру распределения напряжений на поверхности пера лопатки со стороны корыта и спинки.

2. Использование неразрушающих методов анализа тензора напряжений по рентгенодифракционным данным в технологиях производства лопаток компрессоров позволит расширить области применения этих методов для оптимизации и управления технологическими процессами обработки поверхности деталей ГТД на этапе их изготовления и ремонта.

Литература

- Martinez S. A., Sathish S., Blodgett M. P., Shepard M. J. Residual Stress Distribution on Surface-treated Ti-6Al-4V by X-ray Diffraction. — *Experimental Mechanics*. 2003. V. 43. No. 2. P. 141–147.
- XPA 09-286 AFNOR Standard 1999 / Essais non destructifs, méthodes d'essais pour l'analyse des contraintes par diffraction des rayons X", May 1999. — С. 27.
- Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction / SAE J784a // Ed. by M. E. Hilley. 2nd ed. — Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1971.
- Hauk V. Structural and residual Stress Analysis by Nondestructive Methods. — In: *Evaluation — Application — Assessment*. — Amsterdam: Elsevier, 1997, p. 139–152.
- Noyan I.C., Cohen J. B. Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation. — In: *Materials research and engineering*. — New York: Springer-Verlag, 1987, p. 122–126.
- Fitzpatrick M. E., Fry A. T., Holdway P. et al. Determination of residual stresses by X-Ray diffraction. — *Measurement Good Practice Guide*. 2005. No. 52. P. 1–68.

Статья получена 22 августа 2012 г.,
в окончательной редакции — 19 ноября.

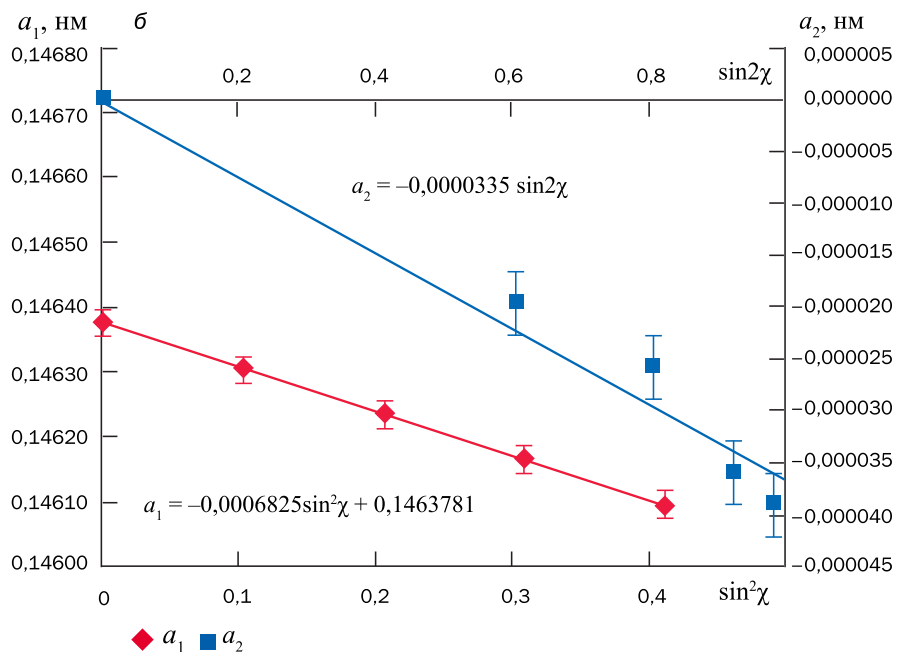
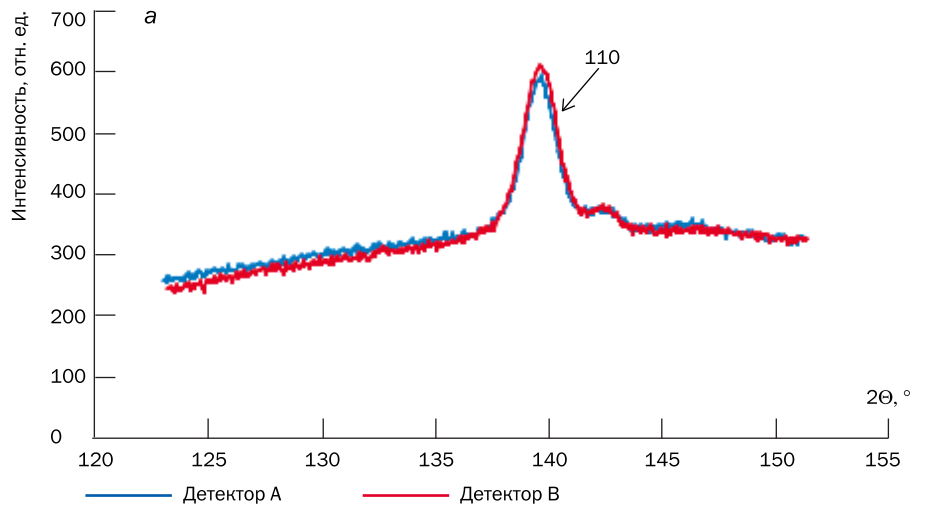


Рис. 3. Рентгенограмма сплава ВТЗ-1 (а) и параметрические зависимости $a_1 = f(\sin^2\chi)$ и $a_2 = f(\sin^2\chi)$ для угла $\varphi = 90^\circ$ на лопатке компрессора в точке 3 со стороны корыта (б)

РЕФЕРАТЫ

(продолжение, начало на стр. 38)

ndtnews

Новые европейские стандарты по радиографии

Два новых стандарта по радиографическому контролю prEN ISO 17636-1 (для пленочной радиографии) и prEN ISO 17636-2 (для цифровой радиографии) находятся сейчас в стадии рассмотрения и согласования. Но они не предназначены для контроля объектов, находящихся в эксплуатации. А сейчас к проблеме контроля в эксплуатации проявляется особый интерес, в том числе — к контролю трубопроводов с целью обнаруже-

ния участков, пораженных, например, питтинговой коррозией. Для этой цели разработаны проекты стандартов prEN 16407-1 и prEN 16407-2. Эти стандарты рассчитаны не только на трубопроводы, но и на другие цилиндрические изделия, например, бойлеры. В данных стандартах первая часть предусматривает контроль через одну стенку, а вторая — через две стенки.

Читателей приглашают к обсуждению стандартов, которые можно найти на сайтах <http://drafts.bsigroup.com/Home/Details/31755> и <http://drafts.bsigroup.com/Home/Details/31756>.

Burch S. Your opportunity to influence new in-service radiography standards. — *NDT News*. Issue 106. June 2012. P. 4.