

УДК 539.26:621.787

**Д-р физ.-мат. наук С. В. Лоскутов, С. В. Сейдаметов,
д-р техн. наук А. В. Ершов, канд. физ.-мат. наук И. В. Золотаревский**

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЭПЮР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГЛУБИНЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Предложен экспериментально-расчетный метод построения эпюр распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя металлов и сплавов, основанный на использовании двух и более рентгеновских трубок с различным материалом анода. Проведена апробация предложенного способа на сплавах титана ВТЗ-1 после упрочняющей обработки стальными шариками в магнитном поле.

Ключевые слова: рентгеноструктурный анализ, остаточные макронапряжения, поверхностный слой, эпюры, поверхностное пластическое деформирование.

Эксплуатационные свойства деталей машин определяются как величиной остаточных напряжений на поверхности, так и характером их распределения по глубине поверхностного слоя. Существующие методы определения остаточных напряжений делятся на разрушающие и неразрушающие. К разрушающим методам относятся химический, рентгеновский, Давиденкова-Биргера и др. Разрушающим методом не представляется возможным проводить сплошной контроль деталей, поскольку требуется полное или частичное разрушение исследуемой детали. Поэтому разработка и создание новых неразрушающих методов построения эпюр распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя деталей машин из различных материалов является актуальной задачей.

На пути решения этой задачи представляется перспективным развитие рентгеновских методов исследования. Так, при наличии двух или более лабораторных дифрактометров, используя способность рентгеновского излучения проникать на различную глубину металла в зависимости от материала анода рентгеновской трубки, представляется возможным получить картину распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя металла.

Апробация предложенного метода построения эпюр проводилась на образцах из сплава титана ВТЗ-1 в форме плоской одинарной лопатки толщиной 2 мм (рис. 1). Химический состав исследуемого сплава титана приведен в таблице 1.

Упрочняющая обработка, предварительно отожженных образцов, осуществлялась на разработанной сотрудниками кафедры физики ЗНТУ установке для обработки стальными шариками в магнитном поле [1] (рис. 2).

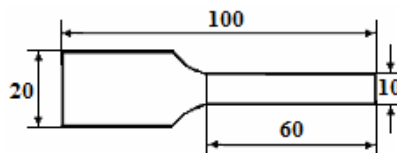


Рис. 1. Экспериментальный образец в форме плоской одинарной лопатки

Между полюсами электромагнита 1, который питается от источника постоянного тока 2, размещаются стальные шарики 3, которые при включении электромагнита образуют квазиупругую среду, свойства которой можно варьировать, изменяя параметры магнитного поля. Обрабатываемая деталь 4 закрепляется в зажиме генератора механических колебаний 5, который питается от источника переменного тока 6. При движении

Таблица 1 – Химический состав титанового сплава ВТЗ-1

Содержание легирующих элементов, % (по массе), остальное – Ti										
Al	Mo	Zr	Cr	Si	Fe	O	H	N	C	Др. элементы
5,5 ч 7,0	2,0 ч 3,0	0,5	0,8 ч 2,0	0,15 ч 0,40	0,2 ч 0,7	0,15	0,015	0,05	0,1	0,3

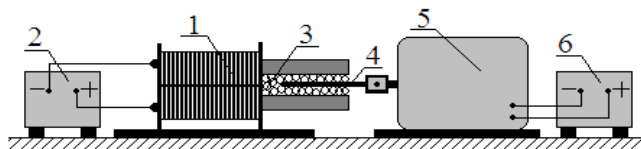


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки для обработки деталей шариками в магнитном поле:
1 – электромагнит; 2, 6 – источник тока; 3 – стальные шарики марки ШХ15; 4 – обрабатываемая деталь;
5 – генератор механических колебаний

детали через рабочую среду стальные шарики обкатываются по поверхности детали, оказывая при этом определенное контактное давление. В результате контактной нагрузки материал поверхностного слоя испытывает многократное пластическое деформирование, вследствие чего происходит формирование остаточных напряжений.

Использовался магнитопровод с квадратным сечением площадью $S = 35 \times 35 \text{ мм}^2$. Индукция магнитного поля в рабочей зоне электромагнита без стальных шариков составляла $B = 0,32 \text{ Тл}$. Поступательное колебание обрабатываемых лопаток осуществлялось в среде шариков из стали ШХ15 переменного диаметра ($d_{\text{max}} = 2,2 \text{ мм}$). Частота колебаний лопатки составляла $\nu = 50 \text{ Гц}$, амплитуда колебания $a = 2,5 \text{ мм}$. Суммарное время обработки составляло 30 минут.

Рентгенодифрактометрические измерения остаточных напряжений до и после обработки выполнялись на дифрактометрах ДРОН-3 и ДРОН-3М с использованием излучений от рентгеновских трубок с медным и кобальтовым анодами соответственно. В качестве линий монокроматического излучения были выбраны $\text{Co } K_{\beta}$ ($\lambda = 1,62075 \text{ Э}$) и $\text{Cu } K_{\beta}$ ($\lambda = 1,39217 \text{ Э}$). Для определения остаточных макроскопических напряжений применяли метод « $2\theta - \sin^2\psi$ », где ψ – угол Вульфа-Брэгга, θ – угол между нормальными к отражающей плоскости и к поверхности образца. Анализировалась линия (213) α -титана.

Исследовались 2 серии образцов. В таблице 2 приведены усредненные (по 5 образцам каждой серии) значения остаточных напряжений.

Для оценки глубины χ проникновения рентгеновского пучка в образец использовали формулу [2, 3]:

$$\chi = U_{\chi} \cdot \frac{\sin \theta}{2\mu}, \quad (1)$$

где U_{χ} – коэффициент, зависящий от выбранной величины той части интенсивности рассеянных лучей, которая обеспечивает получение информации от слоя χ ; θ – угол наклона поверхности образца к падающему рентгеновскому лучу; μ – линейный коэффициент поглощения рентгеновских лучей.

Для 75% интенсивности рассеянных слоев лучей, величина коэффициента U_{χ} согласно имеющимся данным в справочной литературе [2, 3] равна 1,39.

Для сплавов со сложным химическим составом линейный коэффициент поглощения μ рассчитывают по формуле [2, 3]:

$$\mu = \sum \mu_i^* \cdot \rho_i \cdot c_i, \quad (2)$$

где μ_i^* – массовый коэффициент ослабления излучения химическим элементом состава стали; ρ_i – плотность химического элемента; c_i – массовая доля химического элемента в составе сплава титана.

В виду того, что наш исследуемый титановый сплав ВТ3-1 на ≈ 90 масс. % состоит из Ti (табл. 1), то, используя значения массовых коэффициентов поглощения титана [3]:

$$\mu_m = (\mu/\rho)_{Ti} = 226 \text{ см}^2/\text{г для излучения Co } K_{\beta};$$

$$\mu_m = (\mu/\rho)_{Ti} = 151 \text{ см}^2/\text{г для излучения Cu } K_{\beta},$$

и зная плотность титана $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$, из соотношения $\mu_m = \mu/\rho$ находим значение линейного коэффициента поглощения μ для разных излучений:

$$\mu(\text{Co } K_{\beta}) = 1017 \text{ см}^{-1},$$

$$\mu(\text{Cu } K_{\beta}) = 679,5 \text{ см}^{-1}.$$

Таблица 2 – Результаты дифрактометрических измерений остаточных макронапряжений в образцах из сплава титана ВТ3-1 до и после упрочняющей обработки стальными шариками в магнитном поле

Серия образцов, режим обработки	y, МПа			
	Измерения в поперечном направлении		Измерения в продольном направлении	
	вСо	вСи	вСо	вСи
I, после вакуумного отжига $P = (6,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, $t = (800 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ в течение трех часов	39	21	24	19
I, время обработки 30 минут	-515	-481	-778	-695
II, после вакуумного отжига $P = (6,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, $t = (800 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ в течение трех часов	12	-5	-23	17
II, время обработки 30 минут	-496	-452	-723	-659

Теперь, пользуясь выражением (1), зная табличные значения длин волн для кобальтового и медного излучений [3], легко определить глубину проникновения χ . Вычисления проводились для линии (213) α - титана (табл. 3).

Как видно из таблицы 3, наблюдается хорошее согласование теории и эксперимента: для излучения $\text{Co } K_{\beta}$, обладающего меньшей проникающей способностью, значения измеренных остаточных макронапряжений оказались большими, чем при использовании $\text{Cu } K_{\beta}$ -излучения, и наоборот. Установленные закономерности наблюдаются как для продольного направления измерения, так и для поперечного.

Сравнивая полученные данные для макронапряжений (табл. 2) с результатами работы [4] для лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), легко заметить, что существенную роль в формировании плосконапряженного состояния поверхностного слоя играет форма обрабатываемых образцов, а также размер стальных шариков. Обработка образцов в форме плоской одинарной лопатки в среде шариков переменного диаметра дает наилучшие по-

казатели. Обнаруженные закономерности можно объяснить тем, что мелкие шарики, очевидно, заполняют промежутки между более крупными, увеличивается площадь контактного взаимодействия сопряжения «шарик – поверхность», снижается число микровыступов шероховатости, глубина залегания макронапряжений увеличивается. Кроме того, плоская лопатка, в отличие от лопатки компрессора ГТД, имеющей сложный профиль поверхности, при своем поступательном движении не нарушает однородность среды из стальных шариков, хорошая площадь контактного взаимодействия сохраняется на протяжении всего времени обработки.

Выводы

Предложен экспериментально-расчетный метод построения эпюр распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя металлов и сплавов, основанный на использовании двух и более рентгеновских трубок с различным материалом анода; преимущество предложенного метода заключается в возможности проводить сплошной контроль деталей машин без нарушения формы, структуры и свойств их поверхностной области.

Таблица 3 – Глубина поглощения рентгеновского пучка сплавом титана VT3-1

Материал анода	Длина волны λ , Е	$\mu_m = (\mu / \rho)$, см ² /г	μ , см ⁻¹	2θ , град	χ , мкм
Со	1,62075	226	1017	165	6,8
Сu	1,39217	151	679,5	137	9,5

Список литературы

1. Спосіб зміцнюючої обробки деталей машин кульками у магнітному полі / С. В. Лоскутов, Г. В. Пухальська, С. В. Сейдаметов. – Патент № 31103, В24В 39/00, С21D 7/00 від 25.03.2008, Бюл. № 6, 2008 р.
2. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник / Л. И. Миркин. – М. : Машиностроение, 1979. – 132 с.
3. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / Л. И. Миркин. – М. : Физматгиз, 1961. – 863 с.
4. Лоскутов С. В. Влияние обработки лопаток ГТД стальными шариками в магнитном поле на структуру поверхностного слоя / С. В. Лоскутов, С. В. Сейдаметов, Г. В. Пухальская // Материалы трудов 10-й юбилейной междунар. научн.-практич. конф. «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». – Санкт-Петербург. – 2008. – С. 272–279.

Поступила в редакцию 18.03.2011

Лоскутов С.В., Сейдаметов С.В., Ершов А.В., Золотаревский И.В. Методика побудови епюр розподілу залишкових напружень по глибині поверхневого шару металів і сплавів

Запропоновано експериментально-розрахунковий метод побудови епюр розподілу залишкових напружень по глибині поверхневого шару металів і сплавів, заснований на використанні двох і більше рентгенівських трубок з різним матеріалом анода. Проведена апробація запропонованого способу на сплавах титану VT3-1 після зміцнюючої обробки сталевими кульками в магнітному полі.

Ключові слова: рентгеноструктурний аналіз, залишкові макронапруження, поверхневий шар, епюри, поверхнєве пластичне деформування

Loskutov S., Seidametov S., Ershov A., Zolotarevsky I. The method for constructing of distribution diagrams of residual stresses on the depth of the surface layer of metals and alloys

An experimental-computational method for constructing of distribution diagrams of residual stresses on the depth of the surface layer of metals and alloys based on the use of two or more X-ray tubes with different anode materials was proposed. The approbation of the proposed method was made on the titanium alloys VT3-1 after the hardening treatment of steel balls in a magnetic field.

Key words: X-ray analysis, residual macrostresses, surface layer, distribution diagrams, surface plastic deformation.