

УДК 539.261

В.Н. Востров, Н.А. Яблокова, П.А. Кононов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАСКАТАННЫХ ДЕТАЛЯХ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Целью данной работы было исследование неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей параметров напряженного и структурного состояний поверхностей детали с фланцем, изготовленным раскаткой на образующей части трубчатой заготовки из алюминиевого сплава АК7. Полученные данные необходимы для оценки ресурса работы детали.

Детали с фланцами, значительно удаленными от торца, находят широкое применение в машиностроении. Разработанная технология раскатки фланцев на образующей части трубчатой заготовки расширяет технологические возможности процессов объемного формообразования фланцев (поперечно-клиновое прокатка [1], выдавливание [2], торцовая раскатка [3] и др.).

Согласно новой технологии [4] деформирование заготовки осуществляют при поступательном перемещении инструмента одновременно с синхронным вращением заготовки и инструмента за счет контактного трения между их поверхностями. Процесс выполняется деформирующим роликом, установленным с возможностью вращения и поворота относительно оси заготовки.

Формообразование фланца выполняют в два этапа. На первом этапе осуществляют ротационную высадку заготовки и формируют на деформируемой части заготовки усеченный конус. При этом деформирующий ролик устанавливают под углом α_1 к оси приводной матрицы в диапазоне $15^\circ < \alpha_1 < 40^\circ$. На втором этапе деформируют образованный на первом этапе усеченный конус заготовки путем принудительного перемещения воздействующего ролика под углом α_2 к оси заготовки, причем $40^\circ < \alpha_2 < 75^\circ$.

Исследовался процесс раскатки деталей из алюминиевого сплава АК7. Химический состав сплава АК7 в процентах составляет: Al — от 87,4 до 93,86; Fe — до 1,3; Si — от 6 до 8; Ni — до 0,3; Cu — до 1,5; Mg — от 0,2 до 0,5; Zn — до

0,5; примесей — всего 4,1. Механические характеристики сплава: модуль упругости $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа (при температуре $T = 20^\circ\text{C}$), коэффициент Пуассона $\nu = 0,345$.

Решетка сплава АК7 — гранцентрированная кубическая с размером ребра ячейки $a = 0,4047 \pm 0,0001$ нм. Данный параметр меньше, чем у чистого алюминия, что характерно для алюминиевых сплавов, содержащих кремний.

На точность определения методами рентгеноструктурного анализа величин компонентов напряжений в исследуемых деталях влияют метрологические параметры измерительного оборудования, структура и фазовый состав материала, форма и качество поверхности детали.

В деталях из алюминиевых сплавов, в отличие от других сплавов (никелевые, железо-никелевые, титановые и т. д.), неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей можно исследовать поверхностные слои до глубины порядка 20 мкм, используя рентгеновские трубки с разной длиной волны излучения. Таким путем можно получить информацию о влиянии способа обработки на напряженное состояние поверхностных слоев и структуру материала.

В работе использовался рентгеновский анализатор напряжений *XSTRESS 3000 G3R*. Данный дифрактометр имеет укороченную дугу гониометра, два полупроводниковых детектора, установленных на гониометре под углом 180 градусов, две оси вращения и проведения небольших осцилляций по направлениям вращения. Такая конструкция дифрактометра позволяет с высокой точностью проводить анализ параметров напряженного и структурного состояний сложных поверхностных слоев с крупнозернистой и текстурированной структурой материала.

Калибровка дифрактометра проводилась с использованием стандартного порошкового образца Al_2O_3 (ГСО 8631–2004) с параметрами кристаллической решетки $a = 0,47589 \pm 0,00004$ нм

и $s = 1,29919 \pm 0,00001$ нм (ромбоэдрическая сингония), а также эталонного порошкового образца из алюминия с параметром решетки $a = 0,4049 \pm 0,0001$ нм (кубическая сингония).

Первоначально выполнялась приближенная калибровка с использованием эталонного образца, которая позволила выбрать угловой диапазон сплава АК7. На следующем этапе проводилась точная калибровка с использованием стандартного образца. Данная калибровка обеспечила определение абсолютных значений межплоскостного расстояния исследуемого материала с точностью, необходимой для проведения трехосного анализа компонентов напряженного состояния поверхностных слоев деталей и параметров структуры материала.

Расчет структурных параметров детали

Точное определение положения дифракционной линии (пик интенсивности) — одна из наиболее важных задач при анализе параметров напряжений методом рентгеновской дифракции. Для определения положения дифракционной линии используют несколько видов расчетных функций, например кросс-корреляцию, функцию Пирсона VII и другие.

Функция Пирсона VII определяется по следующей формуле [5]:

$$F(X) = \frac{a_0}{\left[1 + 4 \left(\frac{X - a_1}{a_2} \right)^2 \left(2^{1/a_3} - 1 \right) \right]^{a_3}}, \quad (1)$$

где a_0 — амплитуда интенсивности (интенсивность дифракционной линии при углах наклона ψ и φ ; ψ — угол между нормалью к поверхности образца и к отражающей плоскости (hkl) ; φ — азимутальный угол), a_1 — центр дифракционной линии, a_2 — ширина дифракционной линии на полувысоте дифракционного макси-

мума, a_3 — ширина дифракционной линии на основании пика.

Для расчета параметров дифракционной линии использовали следующие обозначения: $FWHM = a_2$; $I = a_0$; $2\theta = A - (k a_1)$, где 2θ — угол дифракции (угол Вульфа — Брегга); A — верхний предел диапазона углов дифракции 2θ , установленный во время калибровки; k — коэффициент перевода координаты шкалы линейного позиционно-чувствительного детектора на углы 2θ .

Процедура подгонки рентгеновского спектра с помощью рентгеновского анализатора напряжений *XSTRESS 3000 G3R* основывается на алгоритме Левенберга — Марквардта (*Levenberg — Marquardt*) [6, 7].

Экспериментальные и расчетные параметры рентгено съемки

Анализ остаточных напряжений на поверхностях раскатанной детали с фланцем из сплава АК7 выполнялся для фазы Al при помощи рентгеновского анализатора напряжений *XSTRESS 3000 G3R* с геометрией рентгено съемки χ -модифицированного гониометра. Углы наклона гониометра составляют $\chi = \pm 40^\circ$, осцилляция $\Delta\chi = \pm 4^\circ$.

В табл. 1 охарактеризованы режимы рентгено съемки для неразрушающего анализа параметров напряжений и структурного состояния детали с фланцем из сплава АК7, которая проводилась с использованием рентгеновских трубок с различной длиной волны излучения.

В таблице обозначено: Z — глубина проникновения рентгеновского излучения; q — угол дифракции; m — линейный коэффициент ослабления излучения; (hkl) — отражающая плоскость; l — длина волны рентгеновского излучения.

Для χ -модифицированного дифрактометра [8]

$$Z = \frac{\cos 2\theta \cos \chi}{\mu \sin \theta (\cos 2\theta - 1)}. \quad (2)$$

Таблица 1

Параметры рентгено съемки раскатанной детали с фланцем из сплава АК7

Режим рентгено-съемки	Излучение	λ , нм	Фаза	(hkl)	2θ , град	μ , 1/мм	Z, мкм, при $\psi = 0^\circ$	Z, мкм, при $\psi = 40^\circ$
№ 1	Ti — K_α	0,274963	Al	220	147,8	76,8	6,2	4,8
№ 2	Cr — K_α	0,229090		311	139,5	45,8	10,0	7,7

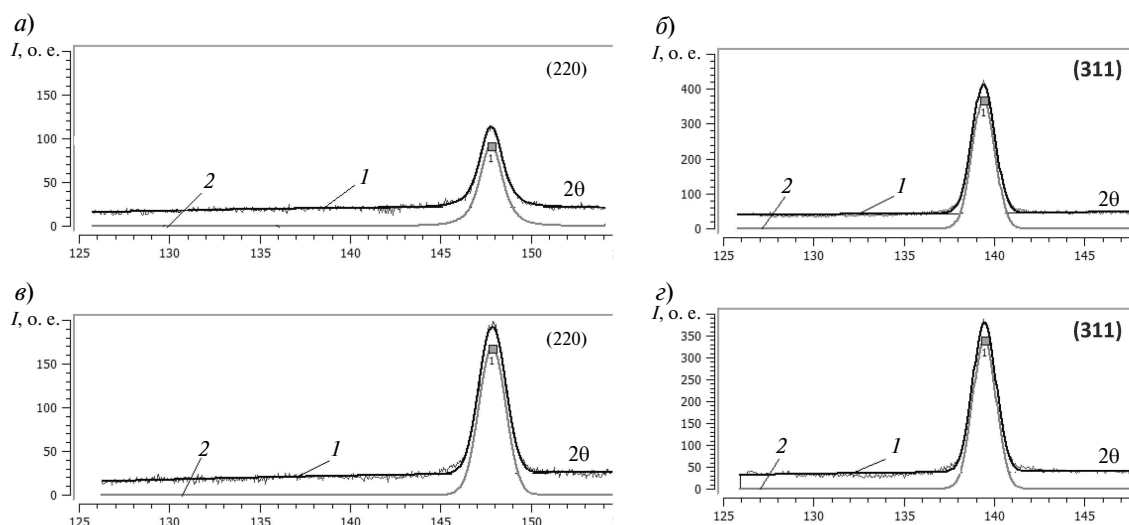


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные рентгенограммы:

a, в — режим 1 рентгено съемки; отражающая плоскость (220); *б, г* — режим 2 рентгено съемки; отражающая плоскость (311). Кривая 1 — экспериментальные значения, кривая 2 — расчетная функция Пирсона VII. Графики *a, б* соответствуют углу расположения детектора $\varphi = 0^\circ$, а *в, г* — $\varphi = 180^\circ$

На рис. 1 показаны рентгеновские спектры сплава АК7, полученные с использованием режимов 1 и 2 рентгено съемки. Верхняя кривая соответствует экспериментальным данным, нижняя — расчетной функции Пирсона VII. На графиках рис. 1 буквой *I* обозначена величина спектра в относительных единицах. Коэффициент подгонки экспериментальной кривой и расчетной функции составляет 0,991 для 1-го режима рентгено съемки и 0,999 — для 2-го режима. Вычитание фона основано на параболической функции. Режим 1 рентгено съемки характеризуется значительным изменением величины интенсивности дифракционной линии в различных направлениях измерения. На дифрактометре *XSTRESS 3000 G3R* детекторы *A* и *B* расположены под углом 180° , что позволяет одновременно исследовать два направления — $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$.

Максимальному значению угла наклона χ соответствует минимальное значение эффективной глубины проникновения рентгеновских лучей — Z_{\min} . При оценке глубины проникновения рентгеновских лучей значение параметра шероховатости R_a анализируемой поверхности не должно превышать Z_{\min} .

Ослабление рентгеновских лучей зависит от длины волны излучения и от характеристик материала. Массовый коэффициент ослабления

рентгеновских лучей для многокомпонентного (легированного) сплава АК7 определяли по формуле [9]

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \alpha_i \frac{\mu_i}{\rho_i}, \quad (3)$$

где i — количество компонентов; α_i — весовая доля i -го компонента; ρ_i — плотность i -го компонента сплава; ρ — плотность сплава.

Измерение параметров напряженного и структурного состояний детали

Расположение точек и направления измерения на поверхностях раскатанной детали с фланцем из сплава АК7, где определялись остаточные напряжения (σ_φ и τ_φ), и структурное состояние поверхностей детали показаны на рис. 2. Направления измерения обозначены как *X* и *Y*. Во всех точках направление измерения *X* — тангенциальное. В точках 1, ..., 4, расположенных на цилиндрических поверхностях, направление *Y* совпадает с осью детали, а в точках 0, А, Б, В, находящихся на торцевых поверхностях, направление *Y* — радиальное.

Остаточные напряжения вычислялись по следующим формулам [6]:

нормальное напряжение в направлении измерения азимутального угла φ

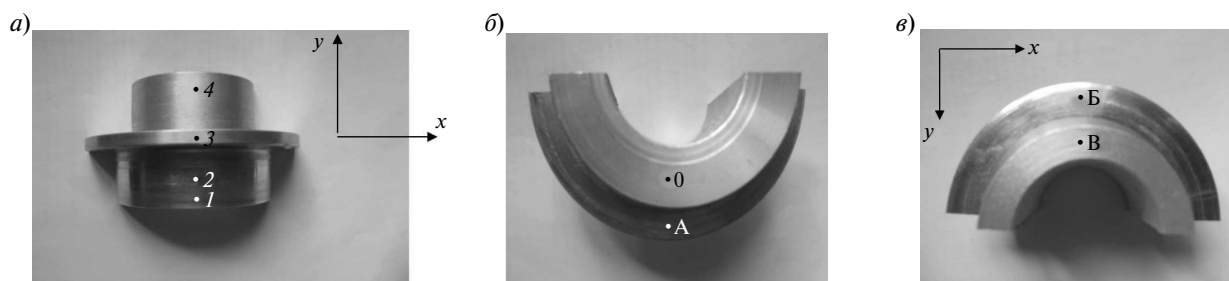


Рис. 2. Расположение точек и направления измерения параметров напряженного и структурного состояний раскатанной детали с фланцем из сплава АК7

$$\sigma_\varphi = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi; \quad (4)$$

касательное напряжение в направлении измерения азимутального угла φ

$$\tau_\varphi = \tau_{13} \cos \varphi + \tau_{23} \sin 2\varphi, \quad (5)$$

где σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , τ_{12} , τ_{13} , τ_{23} — нормальные и касательные компоненты тензора напряжений.

Анализ напряженного состояния раскатанной детали с фланцем проводили по методике исследования трехосных напряжений согласно требованиям стандарта [8].

Согласно требованиям стандарта при рентгеноструктурном оценивании алюминиевых сплавов характеристики структуры металла должны удовлетворять следующим условиям: 1) ширина дифракционной линии должна быть более 1/3 углового диапазона регистрации спектра; 2) текстура — незначительная; 3) величина зерна материала должна быть не менее величины эффективной глубины проникновения рентгеновских лучей в материал. Выполнение этих требований важно не только для повышения точности оценки напряжений, но и для контроля возможности разрушения материала.

Структурное состояние материала, под которым понимается его текстура, косвенно характеризуют параметры $FWHM$ (ширина пика на полувысоте дифракционного максимума) и K_T (коэффициент текстурированности отражающей плоскости) [10]:

$$K_T = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \quad (6)$$

где I_{\max} , I_{\min} — максимальная и минимальная интенсивности дифракционной линии (hkl) при углах наклона χ .

В случае, когда параметр текстурированности $K_T < 3$, анализ напряжений проводился по методике, использующей линейную функцию аппроксимации межплоскостного расстояния кристаллической решетки — $d = d(\sin^2 \chi)$. Если $K_T > 3$, то необходимо учитывать влияние текстуры [11].

Увеличение значения параметра $FWHM$ служит признаком повышения микротвердости. Применение параметра $FWHM$ для оценки уровня микротвердости позволяет неразрушающим способом провести приближенную оценку изменения величины микротвердости поверхности после ее обработки. Значение параметра $FWHM$ зависит от режимов рентгено съемки, свойств и структуры материала.

Для уменьшения влияния текстуры на точность определения угла дифракции применялись режимы рентгено съемки с осцилляцией по углам наклона гониометра χ . Использовались по семь положительных и отрицательных углов наклона χ , а также различные плоскости кристаллической решетки. Это позволило уменьшить максимальную величину параметра K_T для режима 1 рентгено съемки с 3,9 до 3,2, а для режима 2 — с 3,0 до 2,6 (см. табл. 3).

На рис. 3 показаны графики зависимости функции $d = d(\sin^2 \chi)$ межплоскостного расстояния кристаллической решетки от угла наклона χ -модифицированного гониометра на поверхностях детали с раскатанным фланцем из сплава АК7 в точках измерения 0 и В при режиме 1 рентгено съемки с различными параметрами текстурированности K_T . На рис. 4 графики соответствуют режиму 2 рентгено съемки.

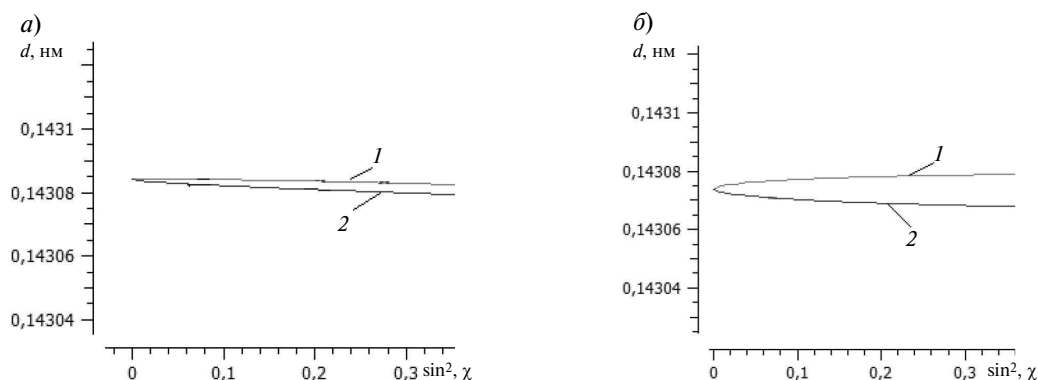


Рис. 3. Зависимости межплоскостного расстояния кристаллической решетки d от $\sin^2\chi$ при режиме 1 рентгено съемки:

а) точка измерения — В; направление измерения — $X(K_T = 2,2)$; б) точка измерения — 0; направление измерения — $X(K_T = 3,1)$. Кривая 1 отвечает положительному углу наклона (χ^+) χ -модифицированного гониометра; кривая 2 — отрицательному углу наклона (χ^-)

Из рис. 3 и 4 следует, что для режима 1 рентгено съемки с использованием титанового излучения параметр текстурированности больше, чем для режима 2. В процессе рентгено съемки различным отражающим плоскостям — (220) и (311) — соответствует различная эффективная глубина проникновения рентгеновских лучей — 6,2 и 10,0 мкм. Это связано с тем, что в материале детали отражающая плоскость (311) менее текстурирована, чем отражающая плоскость (220).

В режиме 1 рентгено съемки на точность определения межплоскостного расстояния

в анализируемом слое детали шероховатость поверхности, степень пластической деформации поверхностного слоя после обработки и текстурированность материала влияют в большей степени, чем при использовании режима 2.

Анализ результатов экспериментов

В табл. 2 представлены результаты определения параметров напряженного состояния поверхностей раскатанной детали с фланцем из сплава АК7 неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей.

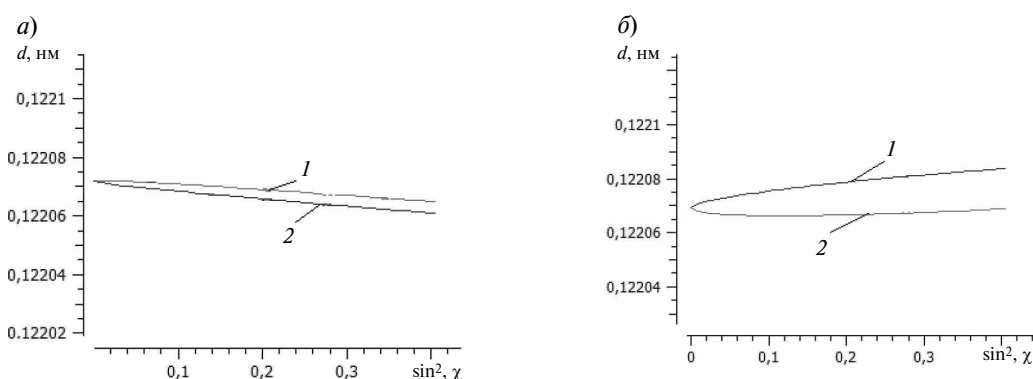


Рис. 4. Зависимости межплоскостного расстояния кристаллической решетки d от $\sin^2\chi$ при режиме 2 рентгено съемки:

а) точка измерения — В; направление измерения — $X(K_T = 1,8)$; б) — точка измерения — 0; направление измерения — $X(K_T = 2,6)$. Кривая 1 отвечает положительному углу наклона (χ^+) χ -модифицированного гониометра, кривая 2 — отрицательному углу наклона (χ^-)

Таблица 2

Результаты определения остаточных напряжений на поверхностях раскатанной детали с фланцем

Место измерения	Направление измерения	В режиме 1 рентгено съемки		В режиме 2 рентгено съемки	
		σ_{φ} , МПа	τ_{φ} , МПа	σ_{φ} , МПа	τ_{φ} , МПа
0	X	-5	2	10	3
	Y	-40	1	-60	1
1	X	-25	2	-40	1
	Y	-70	2	-80	1
2	X	-20	1	-25	2
	Y	-40	2	-35	1
3	X	-5	2	10	7
	Y	-20	2	-30	5
4	X	5	-3	40	-6
	Y	-25	-2	-60	-4
А	X	-5	2	-10	3
	Y	-30	0	-44	2
Б	X	-5	2	-18	4
	Y	-25	-2	-34	-2
В	X	3	1	-10	1
	Y	-20	-3	-20	-1

σ_{φ} — нормальные напряжения, τ_{φ} — касательные напряжения

Исследования выполнялись в двух режимах — 1 и 2. При использовании режима 1 глубина анализируемого слоя составляла 6 мкм, а в режиме 2 — 10 мкм. Точность определения остаточных напряжений в детали более высокая при использовании режима 2 рентгено съемки.

Полученное распределение остаточных напряжений в детали показывает наличие анизотропных свойств, характерных для пластической обработки. В случае приложения к детали во время ее эксплуатации значительных внешних нагрузок в тангенциальном направлении это может способствовать более быстрому накоплению повреждаемости материала и образованию трещины вдоль оси детали с распространением их в радиальном направлении. В направлении измерения X уровень остаточных напряжений сжатия меньше, чем в направлении измерения Y.

Наиболее неблагоприятное распределение остаточных напряжений ($\sigma_{\varphi} = 5$ МПа и $\sigma_{\varphi} =$

$= 40$ МПа) в области точки 4, расположенной на поверхности ступицы не подвергавшейся пластической обработке детали, поскольку напряжения растяжения, действующие в тангенциальном направлении, способствуют уменьшению ресурса работы детали в процессе ее эксплуатации. Самое благоприятное напряженное состояние поверхностного слоя при эксплуатации детали — в точках измерения 1 и 2, расположенных в раскатанной ступице детали.

Исследование остаточных напряжений с использованием двух режимов рентгено съемки показало что обработка поверхности раскаткой улучшает напряженно-деформированное состояние поверхности детали. Это связано с формированием в процессе обработки детали остаточных напряжений сжатия.

Значения параметров структурного состояния материала детали с фланцем, формованным раскаткой, представлены в табл. 3. Из

Таблица 3

Значения параметров $FWHM$ и K_T структурного состояния материала детали с раскатанным фланцем при двух режимах рентгено съемки

Точка измерения	Направление измерения	В режиме 1 рентгено съемки		В режиме 2 рентгено съемки	
		$FWHM$	K_T	$FWHM$	K_T
0	X	1,91	3,2	1,83	2,6
	Y	1,89	2,4	1,82	2,0
1	X	1,76	1,6	1,74	1,3
	Y	1,78	1,7	1,74	1,4
2	X	1,77	1,8	1,72	1,3
	Y	1,77	2,0	1,74	1,3
3	X	1,82	3,1	1,75	2,4
	Y	1,78	1,7	1,82	1,2
4	X	1,83	2,8	1,86	2,1
	Y	1,77	2,6	1,82	1,9
А	X	1,82	2,1	1,82	1,6
	Y	1,78	1,6	1,71	1,5
Б	X	1,83	2,3	1,75	1,3
	Y	1,77	1,6	1,75	1,1
В	X	1,81	2,2	1,78	1,8
	Y	1,86	1,3	1,78	1,5

нее следует, что величина параметра $FWHM$ на участке в области исследуемой точки детали изменяется незначительно в направлениях измерения X и Y. Однако на разных участках поверхности детали величины параметров $FWHM$ различаются. Наибольшие значения параметра $FWHM$ наблюдаются в точках измерения 0 и В, расположенных на торцевых поверхностях детали.

Наибольшая величина параметра текстурированности K_T поверхности детали наблюдается на торце раскатанной ступицы (в точке 0). Параметры текстурированности K_T всех поверхностей детали в тангенциальном направлении измерения остаточных напряжений выше, чем в радиальном направлении. Преимущественная кристаллографическая ориентация формируется вследствие объемного формообразования раскаткой фланца и ступицы детали.

Полученные в исследовании распределения и величины остаточных напряжений в характер-

ных точках поверхностей раскатанной детали с фланцем, значительно удаленным от торца, позволили оценить неразрушающим способом влияние пластической обработки на формирование напряженного состояния и структуры поверхностных слоев детали.

Определение неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей параметров напряженного и структурного состояний поверхностных слоев раскатанных деталей с фланцами, значительно удаленными от торца, из сплава АК7 показало, что объемное формообразование способом раскатки создает в поверхностных слоях детали толщиной 6 мкм остаточные напряжения сжатия и это обеспечивает повышение ресурса работы детали.

Структурное состояние деформированного материала, оцениваемое по показателям текстурированности, является удовлетворительной характеристикой для прогнозирования долговечности детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент RU 2179904 С2. Устройство поперечно-клиновой прокатки изделий переменного сечения [Текст] / В.Г. Артабьевский, В.Н. Митяшин, С.С. Портной // Оpubл. в Б.И.— 2002. № 12.
2. Adams, B. New forming method of complex hollow shafts made from tubes simulation supported process design and processing results [Текст] / B. Adams // В сб.: Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов.— СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2007.— С. 324–329.
3. Ковка и штамповка: справочник в 4-х томах. Т. 3: Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков [Текст] / [Е. Г. Белков [и др.]; под ред. А.М. Дмитриева // М.: Машиностроение, 2010.— 348 с.
4. Кононов, П.В. Формообразование фланцев деформированием образующей части трубчатых заготовок [Текст] / П.В. Кононов, В.Н. Востров // В сб.: Материалы 2-й Международной научно практической конференции.— СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2012.— С. 391–397.
5. Fitzpatrick, M.E. Determination of residual stresses by X-Ray diffraction [Текст] / M.E. Fitzpatrick, A.T. Fry, P. Holdway // Measurement Good Practice Guide.— 2005. № 52.— P. 1–68.
6. Яблокова, Н.А. Анализ напряженно-деформированного состояния лопаток ГТД методом рентгеноструктурного анализа и механическим методом [Текст] / Н.А. Яблокова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование— 2011. №1(117).— С. 117– 122.
7. Noyan, I.C. Residual stress.Measurement by diffraction and interpretation, Materials research and engineering [Текст] / I.C. Noyan, J.B. Cohen // Springer-Verlag.— 2003.— P. 122– 126.
8. Suominen, L. Selected methods of evaluating residual stress gradients measured by X-ray diffraction traditional, full tensor, and wavelet [Текст] / L. Suominen, D. Carr // Copyright(c)JCPDS-International Centre for Diffraction. Advances in X-ray Analysis. – 2000. Vol.43.— P. 78– 82.
9. XPA 09–285. Методы испытаний для анализа остаточных напряжений дифракцией рентгеновских лучей [Текст] // AFNOR (французская ассоциация по стандартизации).— 1999.— 108 p.
10. SAE J784. Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction [Текст].— Second edition.— Chapter 7.3.— 2003.— 61 p.
11. Тейлор, А. Рентгеновская металлография [Текст] / А.Тейлор // М: Металлургия, 1965.— 664 с.