

УДК 539.261:621.787.6

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕНИЯ ЭПЮР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИМ И РЕНТГЕНОВСКИМ МЕТОДОМ****Н.В.Оболенский<sup>1</sup>**

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье рассматриваются результаты определения остаточных напряжений, полученные механическим и рентгеновским методами. Приведены основные сведения об остаточных напряжениях, об их влиянии на эксплуатационные характеристики деталей. Построены эпюры остаточных напряжений, проанализированы полученные результаты, сделан вывод о причинах различия результатов эксперимента.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, механический метод, рентгеновский метод, эпюра.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF OBTAINING OF DIAGRAMS OF TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESSES BY MECHANICAL AND X-RAY METHOD****N.Obolensky**

Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation

The article discusses the results of determination of residual stresses obtained by mechanical and X-ray methods. The article provides the basic information about residual stresses, their effect on the performance characteristics of parts. The article analyzes the results of the constructed residual stresses and concludes the reasons for the difference in the results of the experiment.

*Keywords:* residual stresses; mechanical method; X-ray method; diagram.

**Введение**

Качество материалов деталей, их последующая обработка (механическая, термическая, др.) влияют на эксплуатационную надежность изделий [1]. После любого воздействия детали и конструкции находятся в состоянии остаточной напряженности. Анализ напряженно-деформированного состояния является важной составной частью технической диагностики, наряду с определением прочности, твердости, др. На степень усталостной прочности влияют как направление вектора остаточных напряжений, так их глубина залегания и интенсивность. Эти параметры можно получить путем их измерения. Существует множество методов определения остаточных напряжений, среди которых есть методы разрушающие и неразрушающие [2–19]. Использование неразрушающих методов, например, на основе рентгенодифракционных данных в технологиях производства любых агрегатов, деталей и узлов, позволяет расширить области применения рентгеновского метода для управления технологическими процессами обработки поверхностей на этапе их изготовления [5].

В настоящей работе исследовался алюминиевый сплав 1163РДТВ. Детали из алюминиевых сплавов имеют широкий спектр применения. Основная область применения деталей из алюминиевых сплавов является авиастроение. Из сплава 1163РДТВ изготавливают панели и обшивки самолетов, таких как БЕ-200. К авиастроительной области предъявляются особые требования по качеству деталей, поэтому многие детали из алюминия подвергаются поверхностному упрочнению, которое позволяет повысить качества изделия за счет упругодеформированного поверхностного слоя материала. Поверхностное упрочнение создает благоприятные сжимающие технологические остаточные напряжения и осуществляется различными методами, одним из которых является метод дробемётного упрочнения [20]. Метод упрочнения на УДП заключается в обстреле детали стальной дробью диаметром 0,6 мм–1,2 мм с определенной скоростью от 15 м/с до 53 м/с. В результате удара дроби о деталь возникает микро область упругой деформации. Совокупность таких областей на поверхности обработанной детали образует технологические остаточные напряжения.

**Материалы и методы исследования**

Исследовались образцы сплава 1163РДТВ [21] после упрочнения дробью, которое производилось на установке УДП-2-2,5 [20]. Химический состав сплава 1163РДТВ представлен в табл. 1.

<sup>1</sup> Оболенский Николай Васильевич, магистрант, [nicco-bear@ya.ru](mailto:nicco-bear@ya.ru)  
Obolensky Nikolai, a graduate student, [nicco-bear@ya.ru](mailto:nicco-bear@ya.ru)

**Химический состав сплава 1163РДТВ**

Массовая доля элементов, %								
Fe	Si	Ni	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
0,15	0,1	0,5	0,5-0,8	0,01-0,07	92,5-94	4,1-4,5	1,3-1,6	0,1

Сплав 1163РДТВ относится к системе Al-Cu-Mg, обладает повышенной выносливостью и высокой вязкостью разрушения, благодаря чему его активно применяют в самолетах длительного ресурса в элементах конструкций, критичных по усталости. Маркировка РДТВ означает, что для этого сплава выполняется твердая регламентированная плакировка (РД); сплав применяется в закаленном и естественно состаренном состоянии (Т); обшивочный (В) [22]. Основные механические и физические свойства алюминиевого сплава 1163РДТВ представлены в таблице 2 [23].

Таблица 2

**Механические и физические характеристики свойства сплава 1163 РДТВ**

Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Модуль сдвига, G, МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Модуль упругости, E, МПа	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
459	341	13	0,27	0,31	0,69	2780

Дробеударная обработка обеспечивает равномерное распределение остаточных напряжений в поверхностных слоях, глубина залегания которых определяется интенсивностью обработки [2, 9, 20]. Для исследования характера распределения и глубины залегания остаточных напряжений измеряли остаточные напряжения двумя методами – механическим и рентгеновским.

Механический метод является разрушающим, т.к. предусматривает травление поверхности образца по методу полосок специальным реактивом, размещенным в специальной установке УДИОН-2 [3]. При травлении поверхность вместе с упругодеформированным (напряженным) слоем растворяется, и образец в специальной установке начинает изгибаться, выходить из равновесного состояния. Измерения снимаются за счет изгиба тензометрического датчика, который изгибается вместе с образцом. Погрешность зависит от точности измерения толщины удаляемого слоя и типа деформации (удлинение, изгиб, кручение). В процессе травления получили деформационную кривую, затем по этой кривой проводился расчет напряжений по формуле [3]:

$$\sigma_z(x) = \frac{8E}{1-\mu^2} \frac{h}{a} - a V_z^0(x) - \frac{4E}{3(1-\mu^2)} (h-a)^2 \frac{dV_z(x)}{da} - 4 h - a V_z x + a \int_0^a V_z(x) d\xi, \quad (1)$$

где:

$V_z x$  – приведенные перемещения в направлениях x и z, мм<sup>-1</sup>;

$\xi$  – переменная интегрирования,

E – модуль упругости, МПа

$\mu$  – коэффициент Пуассона материала;

h – начальная толщина пластины, мм;

a – толщина удаленного слоя в процессе травления, мм;

Рентгеновский метод позволяет определять напряжения в деталях сложной геометрической формы неограниченных размеров, исследовать напряжения на небольших участках поверхности образца, измерять градиенты напряжений, определять мгновенные напряжения в деталях, подвергающихся периодическим нагрузкам [7]. К недостаткам можно отнести пониженную точность при работе с сильнодеформируемыми и крупнозернистыми материалами, невозможность одновременного измерения в нескольких точках [24].

Рентгеновский метод осуществляется с помощью специализированного дифрактометра (рентгеновского анализатора напряжений) Xstress 3000 G3R с  $\chi$ -модифицированным гониметром [2, 5, 8–15, 19]. Применение метода дифракции рентгеновского излучения позволяет определить упругие пластические деформации без особой подготовки и разрушения образца. Применение рентгеновских лучей для исследования остаточных напряжений в металлах основано на явлении дифракции рентгеновских лучей при прохождении их через кристаллическую решетку исследуемого материала. Рентгеновский луч, падающий на кристалл, рассеивается его атомами. Рассеянные вторичные волны интерферируют между собой и в направлениях, для которых разность хода лучей оказывается равной целому числу длин волн, возникают дифракционные максимумы. Дифракцию рентгеновских лучей удобно рассматривать как отражение от плоскости (hkl). В отличие от отражения видимого света рентгеновские лучи отражаются селективно, а именно, только в том случае, если длина волны  $\lambda$ ,

межплоскостное расстояние  $d$  и угол дифракции  $\Theta$  (угол между падающим лучом и атомной плоскостью  $(hkl)$ ), связаны уравнением дифракции (уравнение Вульфа – Брегга) [2, 4–15, 19]:

$$n\lambda = 2d \sin \Theta \quad (2)$$

На основе теории упругости для изотропного кристаллического материала, формула для определения деформаций кристаллической решетки  $\varepsilon_{\psi\varphi}$  в направлении линии  $\varphi$  и  $\psi$  имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{\psi\varphi} = \frac{d_{\psi\varphi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi, \quad (3)$$

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

$\psi$  – угол между нормалью к поверхности образца и к отражающей плоскости;

$\varphi$  – угол направления измерений;

$E$  – модуль упругости материала;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\sigma_{\varphi}$  – Одиночное напряжение, действующее в выбранном направлении  $\varphi$ .

### Результаты и обсуждение

Для сравнения результатов измерения остаточных напряжений рентгеновским и механическим методом были получены две эпюры технологических остаточных напряжений рентгеновским и механическим методом на образцах после дробеударного упрочнения. Эпюра – это графическая зависимость остаточных напряжений от глубины (мм), которая отображает интенсивность, глубину залегания и направление вектора напряжений. Эпюра остаточных напряжений, полученная механическим методом, показана на рис. 1.

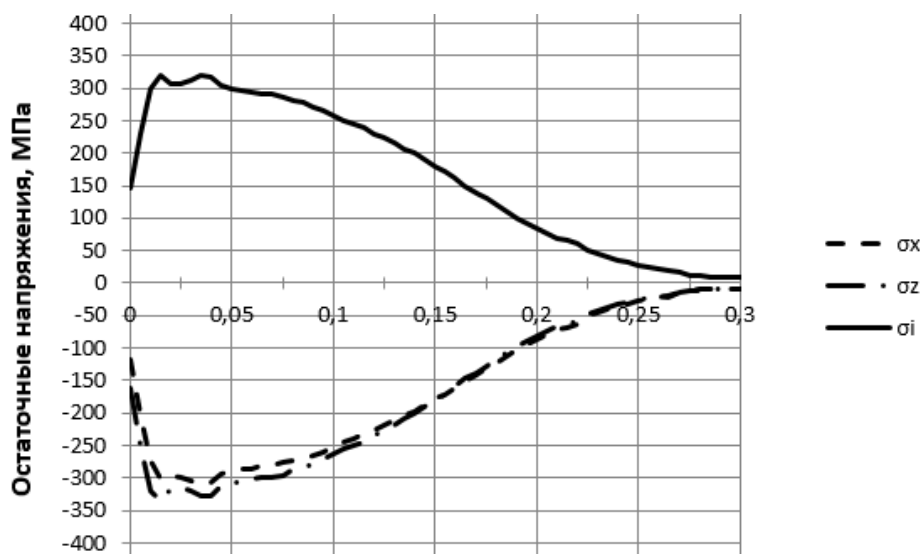


Рис. 1. Эпюра остаточных напряжений, полученная механическим методом

На рисунке 1 приняты условные обозначения:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  – нормальные компоненты плоского напряженного состояния;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Измерения остаточных напряжений рентгеновским методом проводили в Сг-К $\alpha$  излучении для плоскости (311). Для уменьшения влияния текстуры материала применяли осцилляцию по -углам наклона гониометра [5]. Способ обсчета пиков – Cross Correlation. Для построения эпюры на обработанной дробью пластине проводили измерения в продольном (X) и в поперечном (Y) направлении, также в промежуточном направлении (0). Эпюра, полученная рентгеновским методом, показана на рис. 2.

На обеих эпюрах видно, что продольная и поперечная составляющие напряжений лежат в отрицательной области графика, что говорит о том, что остаточные напряжения являются сжимающими. Максимальное сжимающее напряжение составляет 300...330 МПа при глубине залегания в пределах 0,015...0,025 мм. Наблюдается общий характер возрастания напряжений, так как на верхних слоях поверхности преимущественно зона пластических деформаций. Эпюра, построенная рентгеновским методом, показывает достаточно резкое падение напряжений от пиковой области, что со-

ставляет порядка 0,08 мм, в то время как по эюре, полученной механическим методом, можно говорить о том, что глубина залегания равна 0,25 мм.

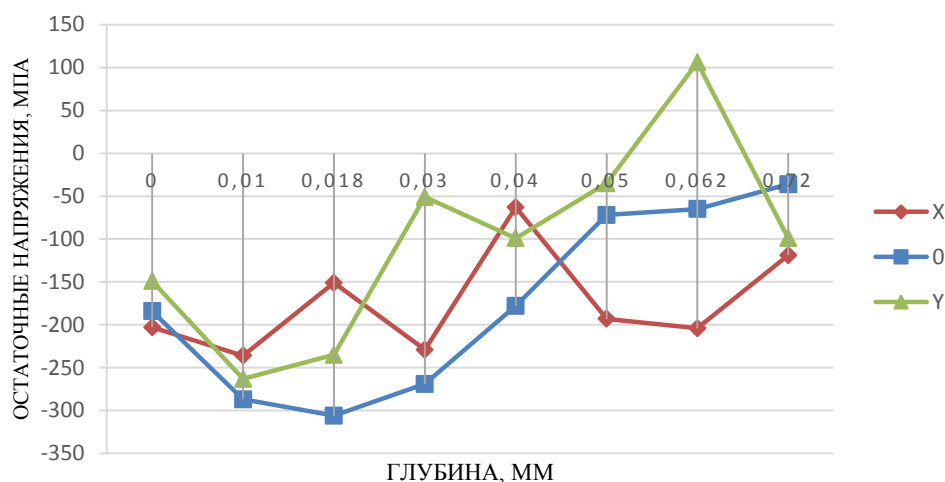


Рис. 2. Эюра остаточных напряжений, полученная рентгеновским методом

### Заключение

Различия в данных могли быть вызваны разными подходами к измерениям. В процессе измерения оказывают влияние некоторые внешние факторы, большинство которых возникают в процессе механического контроля, так как его действие основано на химическом и физическом взаимодействии с исследуемым материалом. Кроме того, при механическом способе имеет место быть общая деформация, которая складывается из упругой деформации ( $\epsilon_{упр}$ ) и деформации, вызванной сдвигом слоев образца по отношению друг к другу, т.е. пластической ( $\epsilon_{пл}$ ). Обе составляющие связаны с действующими в образце деформациями, но так как метод рентгеновской дифракции основан на прецизионном измерении параметров кристаллической решетки, это позволяет связать остаточные напряжения только с упругой деформацией [2, 4].

### Библиографический список

1. Краус И., Госманова Г., Колега М. Физика в инженерной практике // Сибирский журнал науки и технологий. 2005. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/fizika-v-inzhenernoy-praktike> (18.12.2017).
2. Николаева Е.П., Гридасова Е.В., Герасимов В.В. Применение рентгеноструктурного анализа и шумов Баркгаузена для исследования конструкционной стали 30ХГСА после дробеударной обработки // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 2-1. С. 125–132.
3. Замашиков Ю. И., Толстихин К.В. Измерение остаточных напряжений в поверхностном слое механическим методом // Технологии экспериментальных исследований. 2011. Т. 38. С. 370–389.
4. Краус И., Трофимов В.В. Метод рентгеновской тензометрии в технической диагностике металлических изделий [Электронный ресурс]. URL.: [http://mmese-2017.spbstu.ru/konf\\_2011/38.pdf](http://mmese-2017.spbstu.ru/konf_2011/38.pdf) (19.12.2017)
5. Яблокова Н.А. Анализ напряженно-деформированного состояния лопаток компрессора из сплава ВТ3-1 по рентгенодифракционным данным // В мире неразрушающего контроля. 2012. Т. 4, № 58. С. 42–44.
6. Hauk V. Structural and residual Stress Analysis by Nondestructive Methods // In: Evaluation - Application - Assessment. - Amsterdam: Elsevier. 1997. P. 139–152
7. 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
8. Nikolaeva E.P. Structure Investigation of the Constructional Steel St3ps after Argon-Arc Plasma Treatment // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. PP. 500–506. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.870.500
9. Гридасова Е.В., Николаева Е.П. Исследование улучшаемой стали 30ХГСА, обработанной дробью, методами рентгеноструктурного анализа и измерения шумов Баркгаузена: материалы 5-й Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, 27–30 апреля 2015). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. С. 76–83.
10. Николаева Е.П. Исследование структуры конструкционной стали Ст3пс после обработки аргонодуговой плазмой // Труды II Междунар. науч.-техн. конф. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). 2016. С. 191–195.

11. Лучкина Я.В., Николаева Е.П. Определение остаточного аустенита методом рентгеноструктурного анализа в быстрорежущей стали Р6М5К5МП // В сборнике: Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) материалы докладов V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. под редакцией С.А. Зайдеса. 2015. С. 98-105.
12. Николаева Е.П., Никулин Д.С. Применение инновационных средств для контроля качества инструмента из быстрорежущих сталей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2 (50). С. 73-80.
13. Николаева Е.П., Машуков А.Н. Оценка остаточных напряжений в наплавках седел клапанов высокого давления // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 7. С. 26–29.
14. Nikolaeva E.P., Mashukov A.N. Chemical and Petroleum Engineering. 2017. 53: 459. DOI: 10.1007/s10556-017-0363-1
15. Nikolaeva E., Mashukov A. Evaluation of residual stresses in lock valve elements of petrochemical productions. MATEC Web of Conferences 129, 06006 (2017) DOI: 10.1051/mateconf/201712906006
16. Петухов А.В., Донцова С.Г., Николаева Е.П. Исследования процесса плазменного поверхностного упрочнения сплава АТЗ // Сварочное производство. 1992. № 11. С. 17–18.
17. Николаева Е.П., Дергачев Н.Г. Определение остаточных напряжений на основе рентгенофазового анализа в титановом сплаве АТЗ после обработки азотной плазмой // В сборнике: Перспективные технологии получения и обработки материалов Межвузовский сборник научных трудов. Иркутский государственный технический университет. Иркутск, 2010. С. 39-43.
18. Макарук А.А., Хамаганов А.М., Пашков А.А., Самойленко О.В. Исследование напряженного состояния при обработке деталей повышенной жесткости бойковым инструментом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 4. С. 39–46. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-39-46.
19. Nikolaeva E., Vlasov D. Effect of heat treatment conditions on the structure and properties of high-speed steel. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012113
20. Пашков А. Е. Технологический комплекс для формообразования длинномерных панелей и обшивок на базе отечественного оборудования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 1 (5). С. 1528–1534.
21. ОСТ 1-90048-90 Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.
22. ТУ1-801-006-2011 Обшивочные листы толщиной от 1,0 до 4,0 мм из алюминиевого сплава марки 1163.
23. Гетманов А.Г. Экспериментальное исследование механических свойств полимерных покрытий на образцах из алюминиевых сплавов [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Труды МАИ». 2015. Т. 7. №72. URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/ea2/ea2b4519158cbd133fc6bbcee1f59a0a.pdf> (17.12.2017).
24. Каржаубаев А. С. Методика определения остаточных напряжений в наплавленном слое деталей машин // Знание. 2016. № 4-1. С. 62-68.