

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Е.В. Гозбенко¹, Р.С. Большаков¹, А.К. Мозалевская¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск,
Российская Федерация

Исследуется изменение геометрических параметров алюминиевой плиты при снятии поверхностных слоев материала с двух сторон рассматриваемой заготовки при условии, что сжимающие и растягивающие остаточные напряжения находятся в равновесии. Это позволяет использовать гипотезу о тождестве площадей эпюр рассматриваемых напряжений. Предложен нестандартный подход к определению остаточных напряжений при различных вариантах толщины снятия поверхностного слоя с исследуемой заготовки с учетом изменения эпюры остаточных напряжений. При изменении толщины алюминиевой плиты учитывается трансформация вида эпюры остаточных напряжений. Основой предложенного подхода являются известные теоретические положения о виде эпюры остаточных напряжений и стандартный интегральный математический аппарат, позволяющий построить математическую модель изменения площадей эпюр в зависимости от толщины снятия поверхностного слоя исследуемой алюминиевой плиты. Используется гипотеза о равенстве площадей сжимающих и растягивающих остаточных напряжений. Это позволяет исследовать изменение геометрии исследуемой заготовки с учетом корректировки параметров. Полученные результаты дают возможность уточнить известные теоретические положения об изменении эпюры остаточных напряжений после механической обработке исследуемых заготовок из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: интегральные преобразования; математическое моделирование; остаточные напряжения; алюминиевые заготовки.

Введение

Сложившиеся обстоятельства политического и экономического характера обуславливают необходимость переориентации государственных усилий на развитие производственного сектора. Промышленность в условиях всесторонних вызовов находится в стадии поиска собственных резервов для развития производственных технологий. Существует необходимость интенсификации выпуска отечественных высокопроизводительных машин, что провоцирует поиск и разработку способов и средств ускоренной оценки качества выпускаемых изделий. Производство, к примеру, высокотехнологичных деталей для импортозамещения иностранных аналогов связано с контролем качества готовых изделий. Технология производства изделий на начальных этапах предполагает наличие дефектов, в том числе проявляющихся в деформационных изменениях как внутренней структуры заготовки, так и ее внешнего поверхностного слоя. При температурной обработке поверхность детали охлаждается неравномерно, что вызывает возникновение остаточных напряжений, влияющих на прочность готовой детали. В направлении определения остаточных напряжений различными методами известен ряд основополагающих научных исследований отечественных и зарубежных специалистов [1–5]. В данной области перспективными направлениями для научных исследований являются сочетание различных методик определения остаточных напряжений [6–8] и развитие теоретических основ математического моделирования распределения остаточных напряжений, в том числе в заготовках из алюминиевых сплавов, в прикладном аспекте применяемых при производстве деталей в самолетостроении [9–16]. Направление определения остаточных напряжений при помощи разрушающих и неразрушающих методов обладает возможностями подбора таких сочетаний, при которых минимизируется как время определения напряжений, так и

расход материала при сохранении точности измерений. Развитие методологических основ в направлении уточнения теоретических положений математического моделирования перспективно в контексте оценки изменения эпюры остаточных напряжений после механического удаления поверхностного слоя. В предлагаемой статье рассматривается применение интегральных преобразований при определении остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов.

1. Материалы и методы

Исследование поверхностных остаточных напряжений связано с использованием механических методов и методов неразрушающего контроля. Как теоретические, так и экспериментальные исследования остаточных напряжений, возникающих при закалке, показывают, что характер их распределения с высокой точностью можно аппроксимировать параболической зависимостью [10, 11, 15], как показано на рис. 1, где приведена принципиальная схема распределения поверхностных остаточных напряжений в исследуемом образце.

При условии равенства растягивающих и сжимающих напряжений поверхность заготовки из алюминиевого сплава считается ровной. Для корректного определения наличия остаточных напряжений необходимо найти две точки начала эпюры, представляющей собой параболу (тт. *A* и *B*).

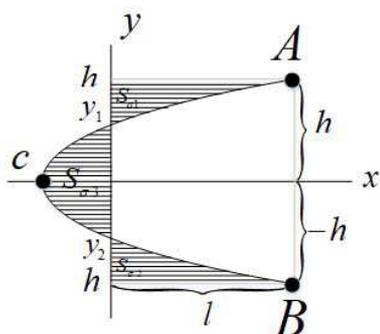


Рис. 2. Расчетная схема определения площадей положительных и отрицательных остаточных напряжений

После этого может быть использован соответствующий математический аппарат для определения остальных частей эпюры, в том числе с использованием равенства площадей напряжений согласно эпюры. Поэтапное проведение действий по приведенному выше алгоритму, а также наличие условия равновесия позволяет перейти к определению общих остаточных напряжений [1], распределенных по параболическому закону, использование которого позволяет применять математический аппарат, основанный на интегральных преобразованиях. После определения двух необходимых точек (*A*, *B*), необходимых для построения эпюры поверхностных остаточных напряжений, распределенной по параболическому закону [7] (рис. 1) и при условии симметричного расположения этих точек, схематичное положение эпюр положительных и отрицательных напряжений с учетом дополнительных параметров можно представить в виде, приведенном на рис. 2, где проиллюстрирована детализированная расчетная схема, предназначенная для построения соотношений между площадями растягивающих и сжимающих напряжений.

На рис. 2 представлены площади остаточных напряжений: S_{σ_1} , S_{σ_2} – площади распределения отрицательных напряжений; S_{σ_3} – площадь распределения положительных напряжений. Отрицательные напряжения в этом случае полагаются растягивающими, а положительные – сжимающими. Для удобства при проведении дальнейших математических выкладок, основанных на использовании выражений на базе параболической зависимости и интегральных преобразованиях, необходимо перейти к разделению области сжатия на две части, обозначив их как $S_{\sigma_{31}}$ и $S_{\sigma_{32}}$, что позволит уравновесить полученные области с имеющимися областями растягивающих напряжений. Детализированная схема приведена на рис. 3.

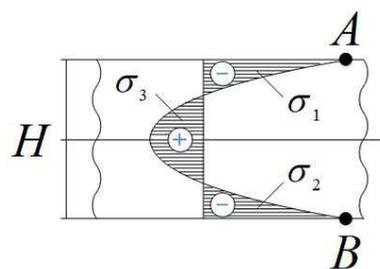


Рис. 1. Принципиальная схема распределения остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов

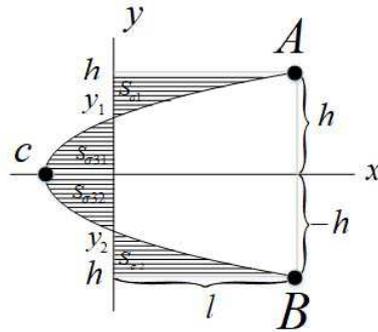


Рис. 3. Детализированная расчетная схема определения площадей положительных и отрицательных остаточных напряжений, сформированная на основе рис. 2

На данной схеме представлены следующие обозначения: l – расстояние от полученных экспериментальным путем точек начала эпюры остаточных напряжений до пересечения кривой параболы с осью Oy , разграничивающей площади растягивающей и сжимающих составляющих напряжений, $h, -h$ – расстояния от точек A и B до оси Ox .

2. Результаты

1. Предлагаются результаты исследований при снятии поверхностных слоев с рассматриваемой заготовки. В первом случае происходит снятие поверхностного слоя толщиной b_1 с нижней грани образца, как показано на рис. 4.

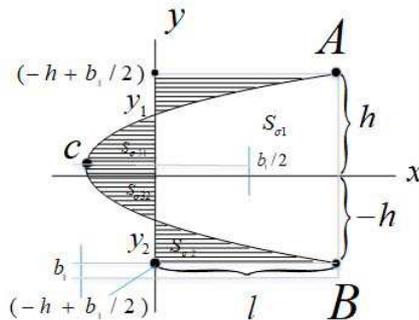


Рис. 4. Детализированная расчетная схема при снятии слоя с одной из граней заготовки

Параметры эпюры остаточных напряжений связаны через классическое уравнение параболы: $x = ay^2 - c$, $a > 0$, $c > 0$. Срез произведен на величину b_1 , что смещает начало координат в сторону верхней грани на $\frac{b_1}{2}$. В этом случае новые координаты примут следующий вид: верхняя грань $-h + \frac{b_1}{2}$; нижняя грань $h - \frac{b_1}{2}$. Необходимо учесть дополнительные соотношения:

$$\begin{aligned} S_1 = S_2, S_3 = S_4, S_1 + S_2 = S_3 + S_4; \\ y = 0, x = -c, y = h - \frac{b_1}{2}, y = -h + \frac{b_1}{2}, x = l; \\ x = 0, x = ay^2 - c, y_{1/2} = \pm \sqrt{\frac{c}{a}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда при $S_2 = S_4$ получим следующую систему преобразований

$$S_2 = \int_{y_2}^{h - \frac{b_1}{2}} (ay^2 - c) dy = \left(h - \frac{b_1}{2} \right) \left[\frac{a}{3} \left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2 - c \right] + y_2 \left[c - \frac{a}{3} y_2^2 \right], \quad (2)$$

$$S_4 = - \int_0^{y_2} (ay^2 - c)dy = - \left[\frac{ay^3}{3} - cy \right]_0^{y_2} = - \left[\frac{ay_2^3}{3} - cy_2 \right]_0^{y_2} = y_2 \left[c - \frac{ay_2^3}{3} \right]. \quad (3)$$

Так как $S_2 = S_4$, то выражения (2) и (3) равны между собой, то есть

$$\left(h - \frac{b_1}{2} \right) \left[\frac{a}{3} \left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2 - c \right] + y_2 \left[c - \frac{a}{3} y_2^2 \right] = y_2 \left[c - \frac{a}{3} y_2^2 \right]. \quad (4)$$

Отсюда

$$\left(h - \frac{b_1}{2} \right) \left[\frac{a}{3} \left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2 - c \right] = 0. \quad (5)$$

Из (5) следует, что

$$h = \frac{b_1}{2}; \frac{a}{3} \left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2 = c. \quad (6)$$

Полагаем, что ширина пластины равна нулю, что не может быть реализовано. С учетом (6) имеем

$$c = \frac{a}{3} \left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2. \quad (7)$$

Подставив найденное выражение (7) в основное уравнение кривой $x = ay^2 - c$, получим

$$x = ay^2 - \frac{a}{3} \left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2. \quad (8)$$

Но при $y = h - \frac{b_1}{2}, x = l$, тогда

$$a = \frac{3}{2} \frac{l}{\left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2}. \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в (7), получим

$$c = \frac{a}{3} \left(h - \frac{b_1}{2} \right)^2 = \frac{l}{2}, \quad (10)$$

Таким образом, $c = \frac{l}{2}$.

2. Второй вариант предполагает снятие слоев с двух граней заготовки (рис. 5).

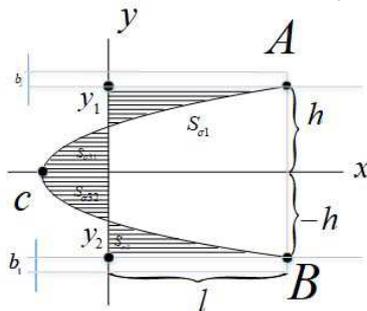


Рис. 5. Детализированная расчетная схема при снятии слоев с двух граней заготовки

В этом случае срез производится с двух сторон на толщину b_1 и b_2 соответственно. Начало координат остается без изменений. Новые координаты верхней грани примут вид: $-h + b_2$, нижней грани $h - b_2$. Также необходим учет дополнительных соотношений (1). Уравнения для трансформации примут вид:

$$S_2 = \int_{y_2}^{h-b_1} (ay^2 - c)dy = (h - b_1) \left[\frac{a}{3}(h - b_1)^2 - c \right] + y_2 \left[c - \frac{a}{3}y_2^2 \right], \quad (11)$$

$$S_4 = - \int_0^{y_2} (ay^2 - c)dy = y_2 \left[c - \frac{ay_2^3}{3} \right]. \quad (12)$$

При этом выражения (10) и (11) будут равны между собой, то есть

$$(h - b_1) \left[\frac{a}{3}(h - b_1)^2 - c \right] + y_2 \left[c - \frac{a}{3}y_2^2 \right] = y_2 \left[c - \frac{a}{3}y_2^2 \right]. \quad (13)$$

Отсюда получим

$$(h - b_1) \left[\frac{a}{3}(h - b_1)^2 - c \right] = 0. \quad (14)$$

Из (12) следует, что

$$h = b_1; \frac{a}{3}(h - b_1)^2 = c. \quad (15)$$

Случай $h = b_1$ не может быть реализован. Тогда

$$c = \frac{a}{3}(h - b_1)^2. \quad (16)$$

В исходное выражение $x = ay^2 - c$ подставим соотношение (13) и получим следующий виде:

$$x = ay^2 - \frac{a}{3}(h - b_1)^2. \quad (17)$$

При $y = h - b_1, x = l$

$$l = \frac{2}{3}a(h - b_1)^2. \quad (18)$$

Анализ выражения показывает, что c также будет равно $\frac{l}{2}$.

3. Рассмотрим случай, при котором снятые слои отличаются толщиной.

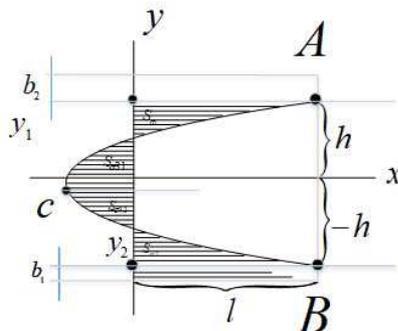


Рис. 6. Детализированная расчетная схема при снятии слоев различной толщины с двух граней заготовки

В этом случае $b_1 \neq b_2$. Начало координат сместилось на $\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{3}$. Новые координаты сверху $-h + b_2$, снизу $h - b_2$. Цепочка преобразования будет выглядеть следующим образом:

$$S_2 = \int_{y_2}^{h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}} (ay^2 - c)dy = \left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right) \left[\frac{a}{3}\left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right)^2 - c\right] + y_2 \left[c - \frac{a}{3}y_2^2\right], \quad (19)$$

$$S_4 = - \int_0^{y_2} (ay^2 - c)dy = - \left[\frac{a}{3}y_2^3 - cy_2\right]_0^{y_2} = y_2 \left[c - \frac{ay_2^2}{3}\right]. \quad (20)$$

Тогда

$$\left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right) \left[\frac{a}{3}\left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right)^2 - c\right] = 0. \quad (21)$$

Из (19) следует, что

$$h = \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}, \frac{a}{3}\left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right)^2. \quad (22)$$

Выражение для определения координаты вершины параболы в этом случае примет вид:

$$c = \frac{a}{3}\left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right)^2. \quad (23)$$

Подставив в $x = ay^2 - c$ выражение (21), найдем

$$x = ay^2 - \frac{a}{3}\left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right)^2. \quad (24)$$

При $y = h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}, x = l$

$$a = \frac{3}{2} \frac{l}{\left(h - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2}\right)^2}. \quad (25)$$

Подставим полученное a в (20), получим $c = \frac{l}{2}$, как в предыдущих двух случаях. Несмотря на положения координаты c , необходимо было исследовать данный факт во всех вариантах механической обработки исследуемого образца.

Заключение

В работе развиваются методологические основы определения остаточных напряжений в алюминиевых плитах при снятии поверхностного слоя с учетом изменения вида эпюры остаточных напряжений. Рассмотрены варианты снятия слоя с поверхностей заготовки в различных сочетаниях. В рамках проведенных исследований оцениваются возможности учета изменения эпюры остаточных напряжений при удалении слоя как с одной стороны заготовки, так и одновременно с двух сторон. При помощи метода интегральных преобразований получены аналитические соотношения для определения характера изменения вида эпюры остаточных напряжений при изменении геометрических параметров алюминиевой заготовки. Проведен анализ полученных аналитических соотношений. Показано, что построенные математические модели отображают изменение общей картины остаточных напряжений по ширине без изменения по длине. Отметим, что проведение дальнейших исследований будет связано с уточнением математических моделей при рассмотрении объемных принципиальных схем алюминиевых плит.

Литература

1. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: МАШГИЗ, 1963.
2. Житников, Ю.З. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, А.Г. Схиртладзе. – Старый Оскол: ООО ТНТ, 2011.
3. Каргапольцев, С.К. Остаточные деформации при фрезеровании маложестких деталей с подкреплением / С.К. Каргапольцев. – Иркутск: Иркутский «Дом печати», 1999.
4. Промптов, А.И. Формирование общих подходов к управлению качеством поверхности при механической обработке / А.И. Промптов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2005. – Т. 22, № 2. – С. 98–101.
5. Тайц, В.Г. Технология машиностроения и производство подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин / В.Г. Тайц, В.И. Гуляев. – М.: Академия, 2007.
6. Каргапольцев, С.К. Современные технологии диагностики остаточных напряжений / С.К. Каргапольцев, А.К. Мозалевская // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – Т. 63, № 3. – С. 15–25.
7. Каргапольцев, С.К. Способы определения термических остаточных напряжений в заготовках типа плит из алюминиевых сплавов / С.К. Каргапольцев, А.К. Мозалевская // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – Т. 60, № 4. – С. 27–32.
8. Rossini, N.S. Methods of Measuring Residual Stresses in Components / N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi // Materials and Design. – 2012. – V. 35, № 1. – P. 572–588.
9. Каргапольцев, С.К. К вопросу оценки наличия остаточных напряжений на алюминиевых плитах / С.К. Каргапольцев, В.Е. Гозбенко, Р.С. Большаков // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 52–58.
10. Weili Cheng. Residual Stress Measurement and the Slitting Method / Weili Cheng, Iain Finie. – New York: Springer Mechanical Engineering Series, 2006.
11. Hauk, V. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods: Evaluation, Application, Assessment / V. Hauk. – Amsterdam: Elsevier, 1997.
12. Jiang Guo. Recent Progress of Residual Stress Measurement Methods / Jiang Guo, Haiyang Fu, Bo Pan, Renke Kang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2021. – V. 34, № 2. – P. 54–78.
13. Mahmoudi, A.H. A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique / A.H. Mahmoudi, S. Hossain, C.E. Truman, D.J. Smith, M.J. Pavier // Experimental Mechanics. – 2009. – V. 49, № 4. – P. 595–604.
14. Pisarev, V.S. Residual Stress Determination by Optical Interferometric Measurements of Hole Diameter Increments / V.S. Pisarev, I.N. Odintsev, S.I. Eleonsky, A.A. Apalkov // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – V. 110, № 1. – P. 437–456.
15. Rustichelli, F. Methods of Measuring Residual Stresses in Components / F. Rustichelli, J.J. Skrzypek // Materials and Design. – 2012. – V. 35, № 1. – P. 572–588.
16. Rustichelli, F. Innovative Technological Materials. Structural Properties by Neutron Scattering, Synchrotron Radiation and Modeling / F. Rustichelli, J.J. Skrzypek. – London, New York: Springer, 2010.

Валерий Ерофеевич Гозбенко, доктор технических наук, профессор, кафедра «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, Российская Федерация), vgozbenko@yandex.ru.

Роман Сергеевич Большаков, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, Российская Федерация), bolshakov_rs@mail.ru.

Анна Константиновна Мозалевская, соискатель, кафедра «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, Российская Федерация), mozalevskay@mail.ru.

Поступила в редакцию 30 июня 2025 г.

MATHEMATICAL MODELLING AT RESIDUAL STRESSES IDENTIFICATION

*E.C. Gozbenko¹, R.S. Bolshakov¹, A.K. Mozalevskaya¹*¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

E-mail: vgozbenko@yandex.ru, bolshakov_rs@mail.ru, mozalevskay@mail.ru

Authors research the task of aluminum plate geometric parameters at excision of surface layer material on both sides of considering billet. This allows us to use the hypothesis of the identity of the areas of the regions of considering stresses. The authors propose a non-standard approach to residual stresses identification for different variants of removing the surface layer with researching billet into account transformations in the residual stress diagram. They take into account the transformation of the residual stress diagram type at changing the thickness of the aluminum billet. The known theoretical provisions on the type of residual stress diagram and the standard integral mathematical apparatus are the basis of the proposed approach. This allows us to build a mathematical model of changing the type of residual stress diagram depending on the thickness of the surface layer removal of the research aluminum plate. The authors research the change in the geometry of the studied workpiece taking into account the correction of the parameters of the residual stress diagram. This makes it possible to use the hypothesis of the equality of the areas of compressive and tensile residual stresses. The obtained results clarify the known theoretical provisions on changing the residual stress diagram after mechanical processing of the studied workpieces made of aluminum alloys.

Keywords: integral transformations; mathematical modeling; residual stresses; aluminum billets.

References

1. Birger I.A. *Ostatochnye naprjazhenija* [Residual Stresses]. Moscow, MASHGIZ, 1963. (in Russian)
2. Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Skhirtladze A.G. *Avtomatizacija proizvodstvennyh processov v mashinostroenii* [Automation of Production Processes in Mechanical Engineering]. Stary Oskol, OOO TNT, 2011. (in Russian)
3. Kargapoltsev S.K. *Ostatochnye deformacii pri frezerovanii malozhestkih detalej s podkrepleniem* [Residual Deformations During Milling of Low-Rigidity Details with Reinforcement]. Irkutsk, Irkutsk Printing House, 1999. (in Russian)
4. Promptov A.I. General Approaches Formation to Quality Control of Surface at Mechanical Treatment. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2005, vol. 22, no. 2, pp. 98–101.
5. Taic V.G., Gulyaev V.I. *Tehnologija mashinostroenija i proizvodstvo podzemno-transportnyh, stroitel'nyh i dorozhnyh mashin* [Mechanical Engineering Technology and Production of Lifting and Transport, Construction and Road Machines]. Moscow, Academy, 2007 (in Russian).
6. Kargapoltsev S.K., Mozalevskaya A.K. Modern Technologies for Diagnostics of Residual Stresses. *Systems. Methods. Technologies*, 2024, vol. 63, no. 3, pp. 15–25. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-3-15-25
7. Kargapoltsev S.K., Mozalevskaya A.K. Methods for Determining Thermal Residual Stresses in Blanks Such as Plates Made of Aluminum Alloys. *Systems. Methods. Technologies*, 2023, vol. 60, no. 4, pp. 27–32. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-27-32
8. Rossini N.S., Dassisti. M, Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of Measuring Residual Stresses in Components. *Materials and Design*, 2012, vol. 35, no. 1, pp. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022
9. Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Bolshakov R.S. On the Issue of Estimation of Residual Stresses Availability on Aluminum Plates. *Systems. Methods. Technologies*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 52–58. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-52-58

10. Weili Cheng, Iain Finie. *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*. New York, Springer Mechanical Engineering Series, 2006. DOI: 10.1007/978-0-387-39030-7
11. Hauk V. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods: Evaluation, Application, Assessment*. Amsterdam, Elsevier, 1997. DOI: 10.1016/B978-0-444-82476-9.X5000-2
12. Jiang Guo, Haiyang Fu, Bo Pan, Renke Kang. Recent Progress of Residual Stress Measurement Methods: a Review *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, vol. 34, no. 2, pp. 54–78. DOI: 10.1016/j.cja.2019.10.010
13. Mahmoudi A.H., Hossain S., Truman C.E., Smith D.J., Pavier M.J. A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique. *Experimental Mechanics*, 2009, vol. 49, no. 4, pp. 595–604. DOI: 10.1007/s11340-008-9164-y
14. Pisarev V.S., Odintsev I.N., Eleonsky S.I., Apalkov A.A. Residual Stress Determination by Optical Interferometric Measurements of Hole Diameter Increments. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 110, no. 1, pp. 437–456. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.06.022
15. Rustichelli F., Skrzypek J.J. Methods of Measuring Residual Stresses in Components. *Materials and Design*, 2012, vol. 35, no. 1, pp. 572–588.
16. Rustichelli, F., Skrzypek J.J. *Innovative Technological Materials. Structural Properties by Neutron Scattering, Synchrotron Radiation and Modeling*. London, New York, Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-12059-6

Received June 30, 2025