

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-7-76-83>

ОЦЕНКА ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ

© **Антон Дмитриевич Монахов***, **Дмитрий Владимирович Гриневич**,
Николай Олегович Яковлев

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Россия, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17; *e-mail: a.d.monakhov@yandex.ru

*Статья поступила 20 октября 2023 г. Поступила после доработки 14 декабря 2023 г.
Принята к публикации 28 декабря 2023 г.*

Разработана конфигурация образца с заданным по глубине распределением остаточных напряжений в целях отработки режимов исследования остаточных напряжений механическими и физическими методами. Способ формирования образца основан на неравномерном пластическом деформировании алюминиевой балки прямоугольного сечения по схеме чистого изгиба. Контроль деформированного состояния в процессе нагружения проводили на торцевой поверхности образца по полю нормальных деформаций, полученных с помощью системы корреляции цифровых изображений. Глубина пластически деформированного слоя составила 1,3 мм, получено симметричное относительно нейтральной оси образца напряженное состояние обратного знака. Теоретическое распределение остаточных напряжений, полученных в результате разгрузки пластически деформированного образца, определено по результатам численного расчета конечно-элементной модели с учетом физико-механических характеристик, упругопластического упрочнения, а также кривой деформирования в истинных координатах, полученной при одноосном растяжении элементарных образцов. Проведено исследование неоднородных по глубине остаточных напряжений методом сверления отверстий в соответствии с ASTM E837 на двух противоположных сторонах образца — областях растяжения при деформировании и сжатия. Контроль деформационного отклика в результате сверления фиксировали с помощью трехосевых тензометрических розеток. Результаты фактического измерения продольной компоненты остаточных напряжений были сопоставлены с их теоретическим распределением, полученным численным способом. Так, среднеквадратичная ошибка измерения остаточных напряжений относительно их теоретического распределения на образце из алюминиевого сплава достигает 18,7 МПа. Стоит отметить, что большие ошибки измерения зафиксированы на малых глубинах, для которых характерны небольшие значения деформаций, сопоставимые с величиной дробового шума.

Ключевые слова: остаточные напряжения; метод сверления отверстий; стандартный образец; пластическая деформация; метод конечных элементов.

EVALUATION OF THE ERRORS OF MEASURING RESIDUAL STRESSES BY THE HOLE DRILLING METHOD

© **Anton D. Monakhov***, **Dmitry V. Grinevich**, **Nikolai O. Yakovlev**

All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials, of National Research Center «Kurchatov Institute», 17, ul. Radio, Moscow, 105005, Russia; *e-mail: a.d.monakhov@yandex.ru

Received October 20, 2023. Revised December 14, 2023. Accepted December 28, 2023.

A sample configuration with a specified distribution of residual stresses in depth was developed to elaborate modes for studying residual stresses using mechanical and physical methods. The sample formation technique is based on non-uniform plastic deformation of an aluminum beam of rectangular cross section according to the pure bending scheme. The control of the deformed state during loading was performed on the end surface of the sample by the field of normal deformations obtained using a digital image correlation system. The depth of the plastically deformed layer was 1.3 mm. The theoretical distribution of residual stresses obtained as a result of unloading of a plastically deformed sample was determined from the results of a numerical calculation of a finite element model, with allowance for the physical and mechanical characteristics, elastic-plastic hardening, as well as the deformation curve in true coordinates obtained as a result of uniaxial tension on elementary samples. A study of residual stresses inhomogeneous in depth was carried out by drilling holes in accordance with ASTM E837 on two opposite sides of the sample: the region of tension under loading and the area of compression, respectively. The control of the deformation

response resulted from drilling was recorded using three-axis strain gauge rosettes. The results of the actual measurement of the longitudinal component of residual stresses were compared with their theoretical distribution obtained by a numerical method. The root-mean-square error in measuring residual stresses, relative to their theoretical distribution, for an aluminum alloy sample reaches 18.7 MPa. It should be noted that largest measurement errors were recorded at small depths, since they are characterized by small values of deformations comparable to the value of shot noise.

Keywords: residual stresses; hole drilling method; reference sample; plastic strain; finite element method.

Введение

Исследование остаточных напряжений получает все большее распространение в связи с развитием аддитивного производства [1 – 3]. Известно, что в результате технологических операций, основанных на неравномерных нагреве и охлаждении, в материале образуются остаточные напряжения [4 – 6]. Их величина в некоторых случаях может достигать предела текучести материала [4 – 6], что оказывает негативное влияние на эксплуатационные свойства изделия и может являться причиной отказа конструкции. Поэтому в ответственных деталях на разных этапах производства контролируют остаточные напряжения.

Контроль конечного изделия, как правило, проводят неразрушающим методом, основанным на дифракции рентгеновского излучения [7]. Метод позволяет исследовать распределения остаточных напряжений II и III родов в приповерхностных слоях изделий из металлических материалов.

В свою очередь, при промежуточном контроле для оценки распределения остаточных напряжений по глубине применяют метод сверления отверстий [8, 9]. По сравнению с другими разрушающими методами повреждения в результате сверления отверстия малы, а в некоторых случаях — незначительны. Несмотря на то, что метод стандартизирован ГОСТ 52891–2007 и ASTM E837–2020, погрешность результатов исследования определяется рядом факторов, таких как способ регистрации деформационного отклика, качество формирования отверстия, величины остаточных напряжений опыт оператора.

Таким образом, для отработки режимов исследований напряженного состояния необходимо разработать универсальный образец с заданным уровнем остаточных напряжений.

Существуют работы по верификации результатов измерения остаточных напряжений [10]. Однако применение известных образцов и установок в большинстве своем [11 – 16] ограничено целью их создания и не предполагает использования для верификации других методов исследования. Стоит отметить стандартный образец, пластически деформированный чистым изгибом [15, 16]. Данный способ отличается простотой, а полученный образец обладает четырьмя по-

верхностями с заданными распределениями остаточных напряжений: две поверхности с градиентом остаточных напряжений по толщине образца могут быть использованы для верификации метода, основанного на рентгеновской дифракции, а две другие поверхности с равномерным распределением напряжений, противоположных по знаку, — для верификации разрушающих методов.

Объект исследований

Верификацию результатов измерения остаточных напряжений методом сверления отверстий проводили на пластически деформированном образце в виде балки прямоугольного сечения с габаритными размерами $100 \times 5 \times 15$ мм из алюминиевого сплава марки В95Т2.

Физико-механические характеристики материала, а также диаграмму деформирования (рис. 1) определяли на аналогичном образце в исходном состоянии в результате испытания на растяжение.

По методике [17] расчетным способом находили участок упругопластического упрочнения в истинных координатах до предела прочности (рис. 2).

Как отмечено выше, остаточные напряжения в материале образца возникают в результате воздействия неравномерной пластической деформации. Исследуемый образец предварительно подвергали упругопластическому деформированию по схеме четырехточечного изгиба для создания в части его рабочего сечения пластических деформаций. При разгрузке из напряжений, рассчитанных по упругопластической модели (рис. 3, а), вычитали напряжения, рассчитанные по упругой модели (рис. 3, б), получая распределение остаточных напряжений по рабочему сечению образца (рис. 3, в).

Для создания остаточных напряжений изгибающий момент должен удовлетворять следующему неравенству [15, 18]:

$$M_e < M \leq M_p, \quad (1)$$

где $M_e = \sigma_{0,2} W_x = 20 \text{ Н} \cdot \text{м}$ — изгибающий момент, при котором все сечение образца работает в упругой области; $M_p = \sigma_{0,2} W_p = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}$ — изгибающий момент, при котором все сечение об-

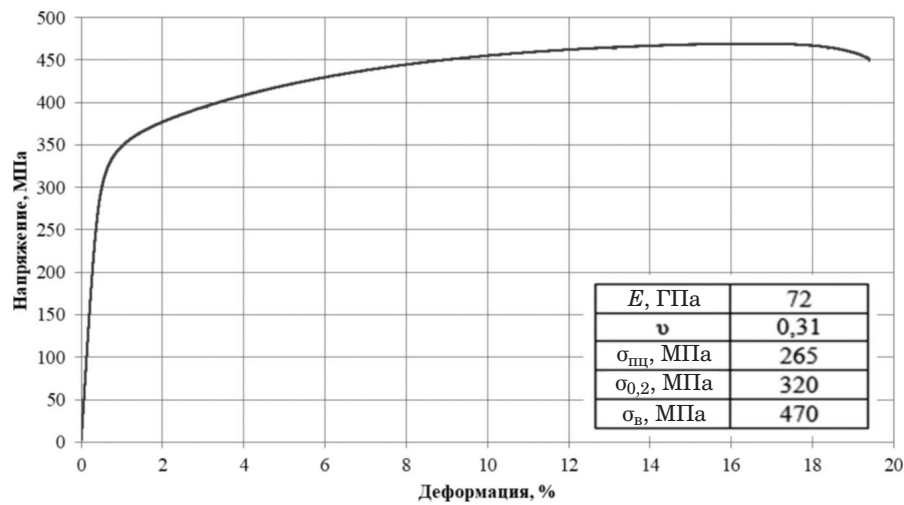


Рис. 1. Диаграмма деформирования образца из алюминиевого сплава марки В95Т2
Fig. 1. Deformation diagram of an aluminum alloy V95T2sample

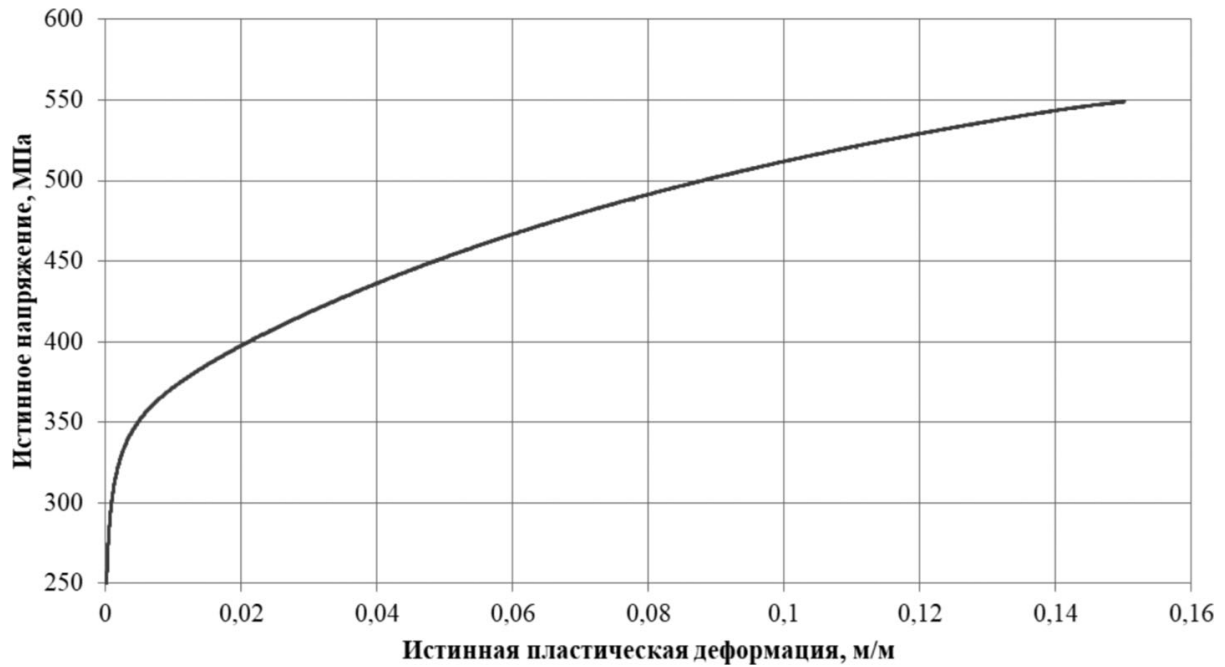


Рис. 2. Участок упругопластического упрочнения алюминиевого сплава марки В95Т2
Fig. 2. Section of elastoplastic hardening of aluminum alloy grade V95T2

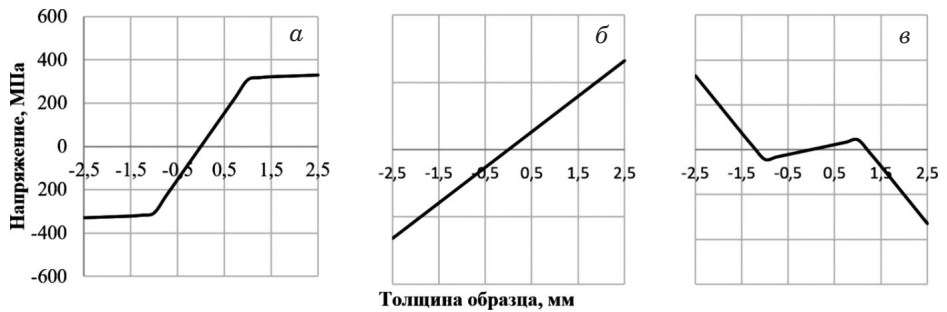


Рис. 3. Предполагаемое распределение упругопластических (а), упругих (б) и остаточных (в) напряжений по толщине образца
Fig. 3. Estimated distribution of stresses in depth of the sample: a — elastoplastic, b — elastic, c — residual

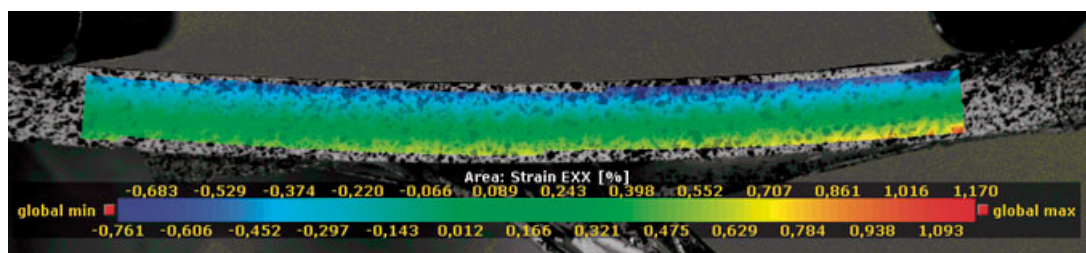


Рис. 4. Распределение продольной компоненты деформаций по рабочему сечению образца

Fig. 4. Distribution of the longitudinal component of strains over the working section of the sample

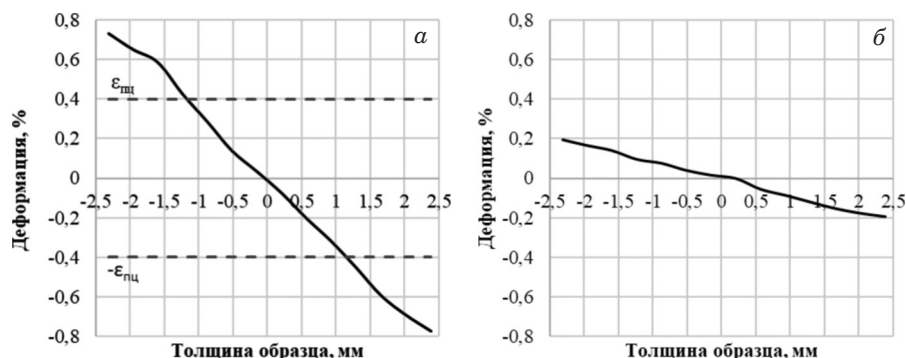


Рис. 5. Распределение упругопластических (а) и остаточных (б) деформаций по толщине образца

Fig. 5. Distribution of elastoplastic (a) and residual (b) deformations over the sample thickness

разца пластически деформировано ($W_x = bh^2/6$ — момент сопротивления сечения балки; $W_p = bh^2/4$ — пластический момент сопротивления сечения балки).

В процессе нагружения образца фиксировали распределение продольной компоненты деформаций с помощью системы корреляции цифровых изображений [19, 20]. Нагружение образца проводили до момента, когда распределение продольной компоненты деформации на не менее чем половине рабочего сечения образца превышало значения деформации, соответствующего пределу пропорциональности (0,4 %). Распределение продольной компоненты деформации по рабочему сечению образца в момент окончания нагружения показано на рис. 4. Распределения этой компоненты по поперечному сечению образца при нагружении представлено на рис. 5, а, а после разгрузки образца — на рис. 5, б. По представленным распределениям деформаций установлена глубина пластически деформированного слоя, которая составляет 1,3 мм. Не выявлено смещения нейтральной оси относительно центра тяжести образца как при нагружении, так и после разгрузки, что говорит о симметричности деформированного состояния. Максимальный изгибающий момент $M = 41,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ — неравенство (1) не выполняется, так как M_p рассчитан по модели идеально пластического тела и не учиты-

вает данные о деформационном упрочнении материала.

Для оценки распределения остаточных напряжений по толщине пластически деформированного образца построена конечно-элементная модель балки с учетом физико-механических характеристик исследуемого материала (см. рис. 1), а также данных о изотропном деформационном упрочнении [21] (см. рис. 2). Аналогично исследуемому образцу модель нагружалась по схеме четырехточечного изгиба нагрузкой, соответствующей изгибающему моменту $M = 41,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$, с последующей разгрузкой. После разгрузки зафиксировано распределение продольной компоненты нормальных напряжений, которое представлено на рис. 6.

Методика испытания

Исследование распределения остаточных напряжений по глубине проводили методом сверления зондирующего отверстия на двух противоположных сторонах образца — в области растяжения при нагружении и области сжатия соответственно. Для учета остаточных напряжений, существовавших в образце до деформирования, сверление проводили также в области, не подверженной нагружению. Контроль деформационного отклика в процессе сверления осуществляли с помощью трехэлементной тензометрической ро-

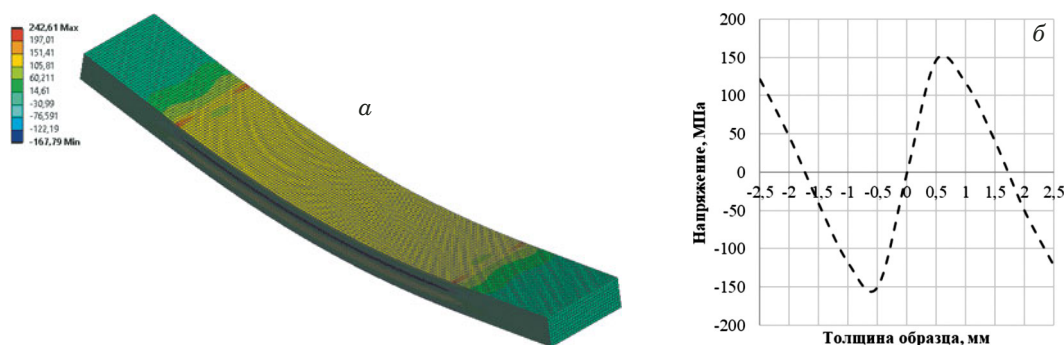


Рис. 6. Распределение продольной компоненты остаточных напряжений по поверхности (а) и толщине (б) модели
Fig. 6. Distribution of the longitudinal component of residual stresses over the surface (a) and in depth (b) of the model

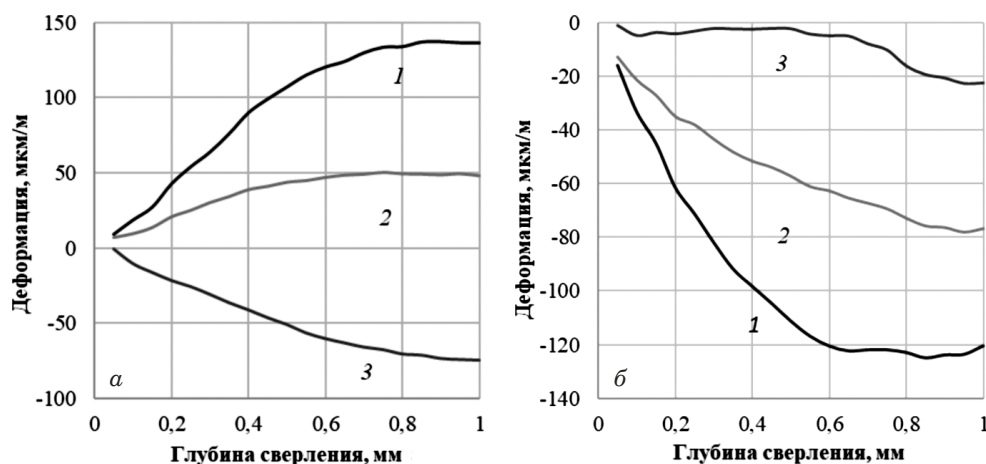


Рис. 7. Распределение деформаций по глубине сверления в области растяжения (а) и сжатия (б): 1, 2, 3 — номера тензорезисторов на тензометрической розетке
Fig. 7. Distribution of deformations in depth of drilling in the region of tension (a) and compression (b), where 1, 2, 3 are the numbers of strain gauges on the strain gauge rosette

зетки типа А с диаметром окружности 5,14 мм, по которой расположены центры датчиков. Тензорозетка была ориентирована вдоль нейтральной оси образца таким образом, чтобы нормальные компоненты измеряемых напряжений соответствовали главным.

Сверление отверстия проводили концевой фрезой с номинальным диаметром 1,6 мм с помощью воздушной турбины, обеспечивающей скорость вращения режущего инструмента около 400 000 об/мин, скорость подачи фрезы — 0,05 мм/мин. Сверление осуществляли в 50 шагов с глубиной шага 0,02 мм, конечная глубина отверстия составила 1 мм. На каждом шаге приращения глубины с помощью ранее установленной тензометрической розетки фиксировали высвободившиеся в результате сверления деформации. Распределение деформаций по глубине приведено на рис. 7.

После сверления были измерены фактические диаметры отверстий, а также фактические смещения отверстий относительно центра тензо-

метрической розетки — ΔX и ΔY соответственно. Для области растяжения фактический диаметр отверстия $d = 1,73$ мм, его смещения относительно центра $\Delta X = 0,01$ мм, $\Delta Y = 0,02$ мм, для области сжатия — $d = 1,67$ мм, $\Delta X = -0,04$ мм, $\Delta Y = 0,05$ мм.

По отношению фактической толщины образца к диаметру тензометрической розетки образец был классифицирован как «массивный». Пересчет высвободившихся в результате сверления деформаций в остаточные напряжения проводили по модели для неоднородного распределения остаточных напряжений по глубине исследования. Матрицы податливости были рассчитаны для описанных выше параметров исследования и скорректированы на величину фактического диаметра отверстия и его смещения относительно центра тензометрической розетки. Результаты расчета остаточных напряжений сглаживали методом регуляризации Тихонова. Испытания и обработку результатов измерений выполняли по ASTM E837. Из распределений остаточных на-

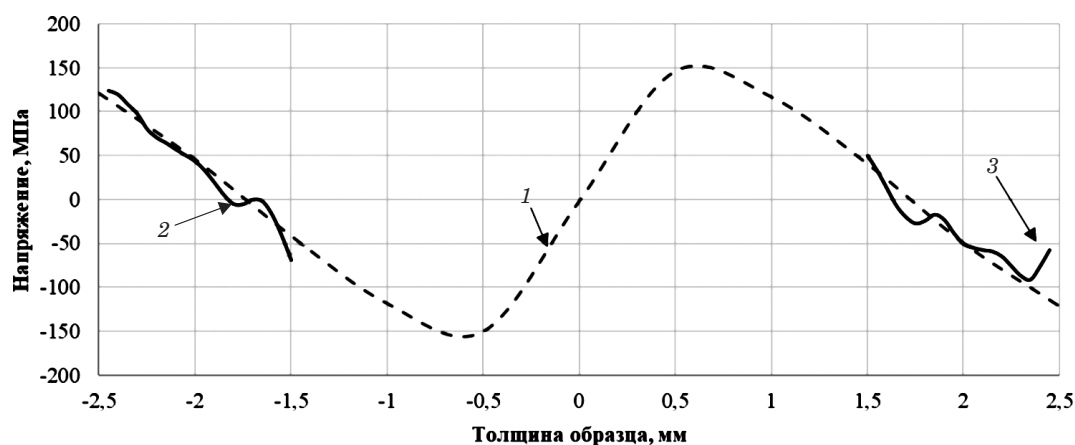


Рис. 8. Распределение продольной компоненты остаточных напряжений: 1 — теоретическое по толщине образца; 2 и 3 — измеренное для поверхностей сжатия и растяжения

Fig. 8. Distribution of the longitudinal component of residual stresses: 1 — theoretical (in depth of the sample); 2 — measured for the compression surface; 3 — measured for the tension surface

пряжений, полученных для поверхностей растяжения и сжатия образца, вычитали распределение остаточных напряжений, полученное для области, не испытывающей нагружение.

Обсуждение результатов

Результаты расчета продольной компоненты остаточных напряжений были нанесены на их теоретическое распределение по толщине образца, полученное в результате математического моделирования методом конечных элементов (рис. 8).

Затем рассчитывали абсолютные среднеквадратические ошибки измерения остаточных напряжений в областях растяжения и сжатия относительно их теоретического распределения:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \hat{\sigma}_i)^2}, \quad (2)$$

где σ_i — напряжения на i -й глубине исследования, полученные методом сверления отверстий, МПа; $\hat{\sigma}_i$ — напряжения на i -й глубине исследования теоретического распределения остаточных напряжений, МПа; n — количество глубин измерений остаточных напряжений.

Проведенная оценка остаточных напряжений позволила правильно определить знак и тренд их распределения по толщине модельного образца. Для случая неоднородного распределения напряжений количественная оценка показала неплохую сходимость с проектными значениями. Так, абсолютная среднеквадратическая ошибка измерения остаточных напряжений относительно их теоретического распределения для области растяжения соответствует 18,7 МПа, а для области сжатия — 10,4 МПа. Наибольшие ошибки рас-

чета соответствуют малым глубинам исследования, так как зафиксированные шумы измерения деформации с амплитудой 0,5 мкм/м могут быть сопоставимы с измеренным значением деформации. Это оказывает большее влияние на результат расчета остаточных напряжений в приповерхностных слоях.

Заключение

Представлены конфигурация образца, а также методика его формирования с заранее известным распределением напряжений, позволяющая отрабатывать режимы исследования остаточных напряжений как механическими, так и физическими методами.

Проведена оценка ошибок измерения остаточных напряжений методом сверления зондирующего отверстия. Так, среднеквадратическая ошибка измерения остаточных напряжений на образце из алюминиевого сплава достигает 18,7 МПа. Большие ошибки измерения зафиксированы на малых глубинах измерения, для которых характерны небольшие значения деформаций.

Следует отметить, что ошибка измерения остаточных напряжений рассчитана относительно их теоретического распределения, в то время как погрешность самой модели в данной работе не определена. Для подтверждения теоретического распределения остаточных напряжений модели необходимо провести исследования на большей выборке образцов с применением других методов исследования остаточных напряжений, в том числе неразрушающих методов измерения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Дынин Н. В., Бенариев И. и др. Изменение структуры и механических свойств при термической обработке алюминиевых сплавов типа ALSi10MG, полученных методом селективного лазерного сплавления / *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 10(808). С. 20 – 28. DOI: 10.30906/mitom-2022-10-20-28
2. Каблов Е. Н., Бакрадзе М. М., Громов В. И. и др. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) / *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1(58). С. 3 – 11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11
3. Медведев П. Н., Гуляев А. И. Анализ пространственного распределения трещин в жаропрочном никелевом сплаве, изготовленном по технологии СЛС / *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1(58). С. 12 – 18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-12-18
4. Попов А. Л., Козинцев В. М., Челюбеев Д. А., Левитин А. Л. Метод отверстия в диагностике остаточных напряжений / *Прикладная математика и механика*. 2021. Т. 85. № 2. С. 210 – 238. DOI: 10.31857/S0032823521010069
5. Хлыбов А. А., Рябов Д. А., Минков К. А. Контроль остаточных напряжений в образцах из стали 5ХНМ акустическим методом / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 9. С. 30 – 36. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-9-30-36
6. Ноняк Д. В., Денисов И. В., Первухина О. Л. Влияние технологического цикла производства на изменение физико-механических характеристик биметалла со стыковым сварным соединением в плакирующем слое / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 7. С. 59 – 66. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-7-59-66
7. Luo Q. A modified X-ray diffraction method to measure residual normal and shear stresses of machined surfaces / *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. P. 3595 – 3606. DOI: 10.3390/lubricants10030037
8. Schajer G. S., Abraham C. Residual Stress Measurements in Finite-Thickness Materials by Hole-Drilling / *Experimental Mechanics*. 2014. Vol. 54. N 9. P. 1515 – 1522. DOI: 10.1007/s11340-014-9935-6
9. Монахов А. Д., Яковлев Н. О., Автаев В. В., Котова Е. А. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) / *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.*, 2021. № 9. Ст. 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104
10. Монахов А. Д., Яковлев Н. О., Шершак П. В. Методы формирования образцов с искусственно созданным распределением остаточных напряжений (обзор) / *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4(73). С. 122 – 132.
11. Valentini E., Benincasa A., Santus C. Bending test rig for validating the hole drilling method residual stress measure-

- ment / *Materials Science Forum*. 2014. Vols. 768 – 769. P. 150 – 157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.768-769.150
12. Beghini M., Santus C., Valentini E., Benincasa A. Experimental verification of the hole drilling plasticity effect correction / *Materials Science Forum*. 2011. Vol. 681. P. 151 – 158. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.681.151
 13. Zhang B., Zhu J. Residual Stress Measurement of an Interference Fit Specimen Based on Moiré Interferometry and Hole-Drilling Method / *Optics*. 2015. N 4(3 – 1). P. 1 – 4. DOI: 10.11648/j.optics.s.2015040301.11
 14. Lefebvre F., Wasniewski E., Francois M. External reference samples for residual stress analysis by X-ray diffraction / *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 996. P. 221 – 227. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.996.221
 15. Гринченко М. И. Методы и технологии создания эталонного образца механических напряжений / *В мире неразрушающего контроля*. 2018. Т. 21. № 1. С. 31 – 35.
 16. Wang X. B. Residual Stress Distribution in Pure Bending Beam Subjected to Tensile Failure on One Side / *Materials Science Forum*. 2006. Vols. 524 – 525. P. 253 – 258. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.524-525.253
 17. Монахов А. Д., Гуляев М. М., Гладышева Н. Е. и др. Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах / *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023. № 29(3). С. 79 – 88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88
 18. Валиуллин А. Х. Предельный упругопластический изгиб балки / *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. № 2. С. 70 – 75.
 19. Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. W. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. — Columbia, SC, USA: University of South Carolina, 2009. — 322 p.
 20. Zabala J., Peñafiel R., Oscar S. On the Digital Image Correlation Technique / *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 49. Part 1. P. 79 – 84. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.476
 21. Букеткин Б. В., Жуков В. С., Ширшов А. А. Поперечный изгиб заготовки прямоугольного сечения при больших пластических деформациях / *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2022. № 2(122). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-2-2150

REFERENCES

1. Kablov E. N., Dynin N. V., Benarieb I., et al. Changes in the structure and mechanical properties under heat treatment of ALSi10MG-type aluminum alloys obtained by selective laser melting / *Metalloved. Term. Obrab. Met.* 2022. N 10(808). P. 20 – 28 [in Russian]. DOI: 10.30906/mitom-2022-10-20-28
2. Kablov E. N., Bakradze M. M., Gromov V. I., et al. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE “VIAM” (review) / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2020. N 1(58). P. 3 – 11 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11
3. Medvedev P. N., Gulyaev A. I. Analysis of the spatial distribution of cracks in a heat-resistant nickel alloy manufactured using SLM technology / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2020. N 1(58). P. 12 – 18 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-12-18
4. Popov A. L., Kozintsev V. M., Chelyubeev D. A., Levitin A. L. Hole method in residual stress diagnostics / *Prikl. Matem. Mekh.* 2021. Vol. 85. N 2. P. 210 – 238 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0032823521010069
5. Khlybov A. A., Ryabov D. A., Minkov K. A. Acoustic control of the residual stresses in steel 5KhNM samples / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2020. Vol. 86. N 9. P. 30 – 36 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-9-30-36
6. Nonyak D. V., Denisov I. V., Pervukhina O. L. The influence of the technological cycle of production on the change in the physical and mechanical characteristics of bimetal with a butt welded joint in the cladding layer / *Indestr. Lab. Mater. Diagn.* 2021. Vol. 87. N 7. P. 59 – 66. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-7-59-66
7. Luo Q. A modified X-ray diffraction method to measure residual normal and shear stresses of machined surfaces / *The Inter-*

- national Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119. P. 3595 – 3606. DOI: 10.3390/lubricants10030037
8. **Schajer G. S., Abraham C.** Residual Stress Measurements in Finite-Thickness Materials by Hole-Drilling / *Experimental Mechanics*. 2014. Vol. 54. N 9. P. 1515 – 1522. DOI: 10.1007/s11340-014-9935-6
 9. **Monakhov A. D., Yakovlev N. O., Avtaev V. V., Koto-va E. A.** Destructive methods for determining residual stresses (review) / *Tr. VIAM*. 2021. N 9. Art. 10. [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104
 10. **Monakhov A. D., Yakovlev N. O., Shershak P. V.** Methods for the formation of objects with an artificially created residual stresses (review) / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2023. N 4(73). P. 122 – 132 [in Russian].
 11. **Valentini E., Benincasa A., Santus C.** Bending test rig for validating the hole drilling method residual stress measurement / *Materials Science Forum*. 2014. Vols. 768 – 769. P. 150 – 157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.768-769.150
 12. **Beghini M., Santus C., Valentini E., Benincasa A.** Experimental verification of the hole drilling plasticity effect correction / *Materials Science Forum*. 2011. Vol. 681. P. 151 – 158. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.681.151
 13. **Zhang B., Zhu J.** Residual Stress Measurement of an Interference Fit Specimen Based on Moiré Interferometry and Hole-Drilling Method / *Optics*. 2015. N 4(3 – 1). P. 1 – 4. DOI: 10.11648/j.optics.s.2015040301.11
 14. **Lefebvre F., Wasniewski E., Francois M.** External reference samples for residual stress analysis by X-ray diffraction / *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 996. P. 221 – 227. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.996.221
 15. **Grinchenko M. I.** Methods and technologies for creating a reference specimen of mechanical stresses / *V Mire Nerazr. Kontr.* 2018. Vol. 21. N 1. P. 31 – 35 [in Russian].
 16. **Wang X. B.** Residual Stress Distribution in Pure Bending Beam Subjected to Tensile Failure on One Side / *Materials Science Forum*. 2006. Vols. 524 – 525. P. 253 – 258. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.524-525.253
 17. **Monakhov A. D., Gulyaev M. M., Gladysheva N. E., et al.** Application of the digital image correlation method for determination of deformation curves in true coordinates / *Izv. Vuzov. Tsvet. Met.* 2023. N 29(3). P. 79 – 88 [in Russian]. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88
 18. **Valiullin A. Kh.** Ultimate elastoplastic bending of a beam / *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2012. Vol. 15. N 2. P. 70 – 75 [in Russian].
 19. **Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. W.** Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. — Columbia, SC, USA: University of South Carolina, 2009. — 322 p.
 20. **Zabala J., Peñafiel R., Oscar S.** On the Digital Image Correlation Technique / *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 49. Part 1. P. 79 – 84. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.476
 21. **Buketkin B. V., Zhukov V. S., Shirshov A. A.** Transverse bending of a rectangular workpiece at large plastic deformations / *Eng. J. Sci. Innovations*. 2022. N 2(122) [in Russian]. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-2-2150