

## **Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM**

**Бабайцев А.В.\*, Рабинский Л.Н., Ян Наинг Мин**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия,*

*\*e-mail: [Ar77eny@gmail.com](mailto:Ar77eny@gmail.com)*

**Статья поступила 12.08.2021**

### **Аннотация**

На сегодняшний день аддитивные технологии используются для создания физических моделей, прототипов, образцов, инструментальной оснастки и производства пластиковых, металлических, керамических, стеклянных, композитных компонентов и компонентов из биоматериалов. Наибольший технологический интерес представляет изготовление конечных деталей из металлических сплавов, применяемых в авиакосмической индустрии, машиностроении, автомобилестроении, нефтегазовой отрасли, электронике, медицине и других отраслях промышленности. К наиболее прогрессивной и популярной технологии 3D-печати металлами относится селективное лазерное плавление (SLM). При изготовлении изделий по технологии SLM можно воспроизводить сложные геометрические формы, включая внутренние полости и каналы, а также при продуманных дизайнерских решениях – добиться минимального объема механической обработки и исключения дорогостоящей оснастки. Однако в следствии спекания порошка и локального неравномерного перегрева в синтезируемых деталях образуются температурные остаточные напряжения. Уровень которых может существенно повлиять на работу получаемых

изделий. В работе представлен вариант методики определения остаточных напряжений в изделиях из нержавеющей стали PH1, полученных по технологии SLM. Для этого проводилось исследование остаточных напряжений на плоских прямоугольных образцах выращенных в 3х направлениях относительно плоскости построения (параллельно, перпендикулярно и под углом 45 градусов к платформе построения). Методика определения остаточных напряжений основана на определении деформации при сверлении зондирующего отверстия и последующего численного расчета для определения остаточных напряжений. Фиксация деформаций проводилась с использованием метода корреляции изображений. Подобный бесконтактный метод позволяет с высокой точности определить поле перемещений и деформаций с использованием сверлильной установки и фотокамеры с макрообъективом. Численный расчет проводился методом конечных элементов с учетом определенных деформаций из эксперимента в среде COMSOL Multiphysics. В результате расчетов было получено распределение остаточных деформаций и напряжений по всем образцам для всех его компонентов. Наиболее показательные результаты были получены на образце выращенного в плоскости построения.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, SLM, остаточные напряжения, зондирующие отверстия, корреляции цифровых изображений.

## 1. Введение

В настоящей работе рассматривается подход к оценке остаточных напряжений, основанный на методе корреляции цифровых изображений (КЦИ), и последующего определения остаточных напряжений, полученных путем численного расчета в образцах из нержавеющей стали PH1, напечатанных по технологии SLM. Во всех

конструкциях знать уровень остаточных напряжений очень важно [1-5]. Фотоизображения и видеокadres применяются для анализа широкого круга прочностных, газодинамических, материаловедческих задач [6-8]. Имеющееся двухмерное распределение деформаций и напряжений позволяет качественно отслеживать картины исследуемых процессов. Подобный комбинированный подход позволит более качественно с достаточной точностью оценить остаточные напряжения в сложных анизотропных материалах.

Образцы из нержавеющей стали изготавливались по технологии SLM с использованием металлического 3Д принтера EOS M270 и порошка PH1 производителя EOS. Образцы печатались с геометрическими размерами 50\*50\*4мм в трех направлениях относительно плоскости печати: 0° – параллельно плоскости печати, 90° – перпендикулярно плоскости печати и по 45° относительно плоскости печати [9-13]. Для определения механических свойств синтезируемых образцов проводилась одновременная печать образцов на растяжение, сжатие и изгиб [14]. Все исследуемые образцы также печатались в трех направлениях относительно плоскости печати. Все исследуемые образцы печатались при одинаковых режимах синтеза, рекомендованных производителем EOS. Компоновка образцов в рабочей камере представлена на рис. 1, а процесс изготовления и изготовленные образцы на платформе до удаления технологических поддержек показаны на рис. 2.

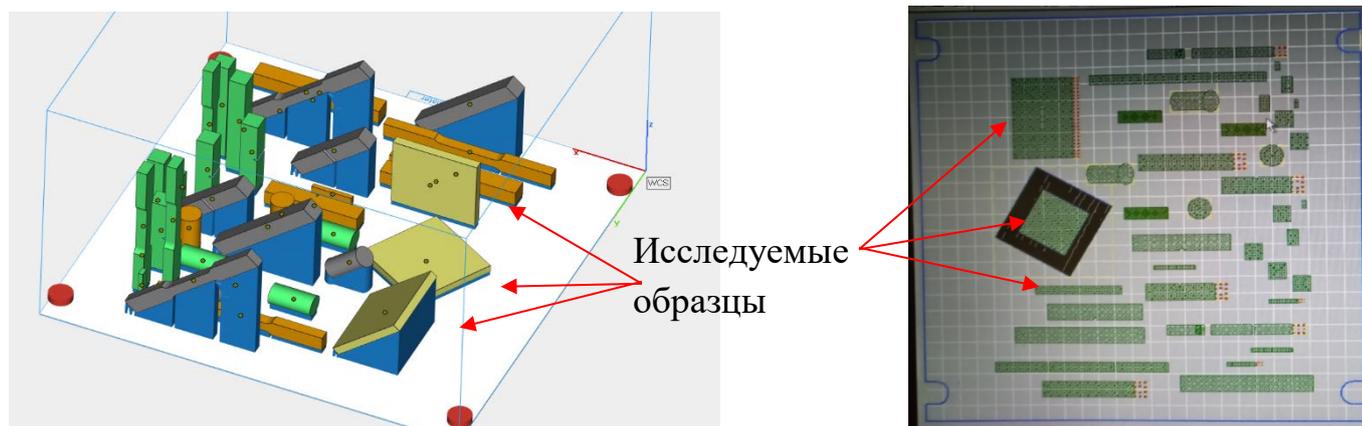


Рис. 1. Компоновка образцов в рабочей камере 3д принтера.

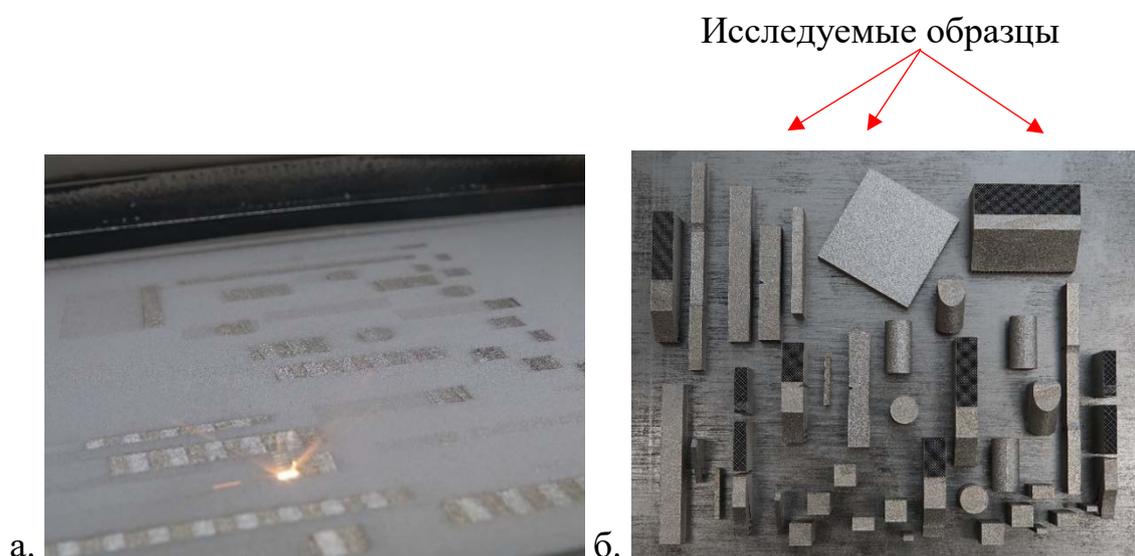


Рис. 2. Процесс изготовления и изготовленные образцы на платформе до удаления технологических поддержек (а – процесс печати, б-напечатанные образцы)

Образцы срезались с платформы с использованием ленточнопильного полуавтоматического станка UE-918НА и дремеля. Для исследования возникающих остаточных напряжений низкотемпературный отжиг полученных образцов не проводился. Фото образца после фрезерования представлен на рис. 3.

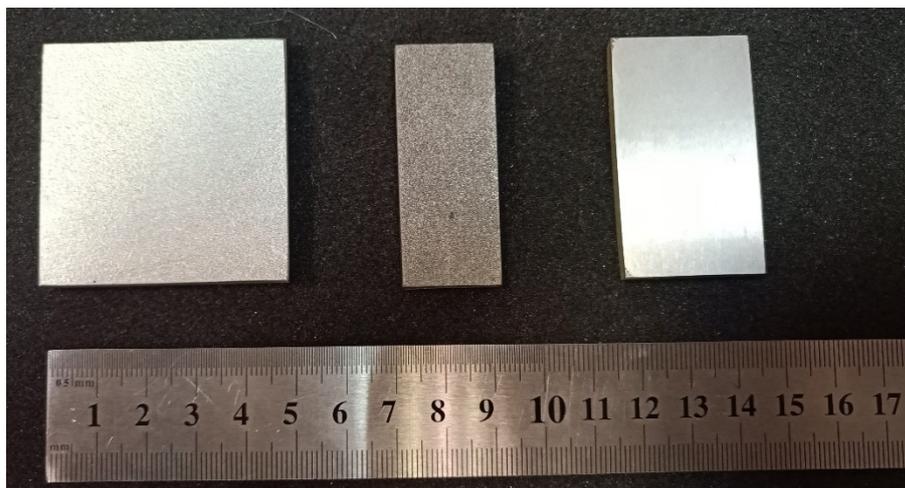


Рис. 3. Стальные образцы, полученные по технологии SLM

(слева направо: образец, напечатанный в плоскости, перпендикулярно и под углом  $45^\circ$  относительно плоскости печати)

Свойства нержавеющей стали РН1 представлены в таблице 3. Испытания образцов для исследования остаточных деформаций проводились в сварочном кондукторе. Таким образом, ровные образцы фиксировались с заданной ориентацией относительно фотокамеры, а образцы с поводками дополнительно выводились в плоскость.

Таблица 3. Свойства нержавеющей стали

Марка	Плотность, [кг/см <sup>3</sup> ]	Модуль упругости, [ГПа] (вдоль/ поперек)	Кэф. Пуассона (вдоль/ поперек)	Предел текучести, [МПа]	Предел прочности, [МПа]	Удлинение при разрыве, [%] (вдоль/ поперек)
РН1	7,8	208	0,3	1050	1150	16

## 1. Материалы и методы

Для получения остаточных напряжений метод разделяется на два этапа: экспериментальное определение деформаций при зондирующем отверстии и решение обратной задачи по определению остаточных напряжений. Комплексный подход применения данных вариантов позволяет провести детальный анализ исследуемых процессов, с выявлением причин их создания и дать количественные результаты [15-20].

ДИС-методы относятся к перспективным методам экспериментальной механики. В отличие, например, от контактной или лазерной бесконтактной тензометрии, ДИС-методы позволяют проводить измерение перемещений и деформаций на участках и элементах поверхности испытываемых образцов и получать полную картину деформированного состояния материала. При этом измерения могут проводиться, фактически, на любых масштабных уровнях – от нано/микро уровня при исследовании структуры материалов, до макро уровня при испытании конструкций. Однако, применение ДИС-анализа в методе зондирующих отверстий на сегодняшний день не регламентировано какими-либо стандартами, что связано, по-видимому, с необходимостью достаточно сложной процедуры настройки ДИС-систем для получения качественных результатов измерений. Требуется обеспечить необходимый рельеф (или контрастный паттерн-рисунок) на поверхности материала, характерный размер которого должен быть согласован с разрешением фото/видео камер, применяемых для получения изображений.

Для проведения DIC-анализа проводилась подготовка поверхности образца. Поверхность образца обезжиривалась обезжиривателем Нефрас С 2-80/120 (БР-2). Далее на исследуемую часть поверхности наносился равномерный слой белой краски. Паттерн наносился аэрографом с диаметром сопла 0,2 мм. Характерный размер точек в получаемых рисунках варьировался от 0.02 мм до 0.2 мм. Для обработки экспериментальных данных, применялась программа DICe (Digital Image Correlation Engine). Эта свободно-распространяемая программа реализует метод корреляции цифровых изображений (DIC), имеет открытый исходный код, предназначенный для использования в качестве модуля во внешнем приложении или как самостоятельное приложение. DICe позволяет вычислять смещения и деформации на заданных участках поверхности материалов на основе анализа и сопоставления последовательностей цифровых изображений. По умолчанию используются соотношения для конечных деформаций в форме Грина-Лагранжа (то есть с учетом квадратичных слагаемых в определении деформаций по градиентам перемещений). Анализируемые изображения обычно представляют собой поверхность образца материала, подвергаемого эксперименту по определению характеристик.

Для оценки остаточных напряжений в образцах проводилось решение обратной задачи с использованием конечно-элементного моделирования в среде COMSOL.

## **2. Результаты и обсуждение**

### **2.1. Идентификация деформаций**

Для образцов, полученных 3д печатью, удалось провести полноценный анализ только для варианта, изготовленного под углом 90 градусов к плоскости печати.

Изображения этих образцов показаны на рис. 4. Результаты DIC-анализа показаны на рис. 5.



Рис. 4. Образец стали, изготовленный по технологии 3д печати, до и после нанесения зондирующего отверстия.

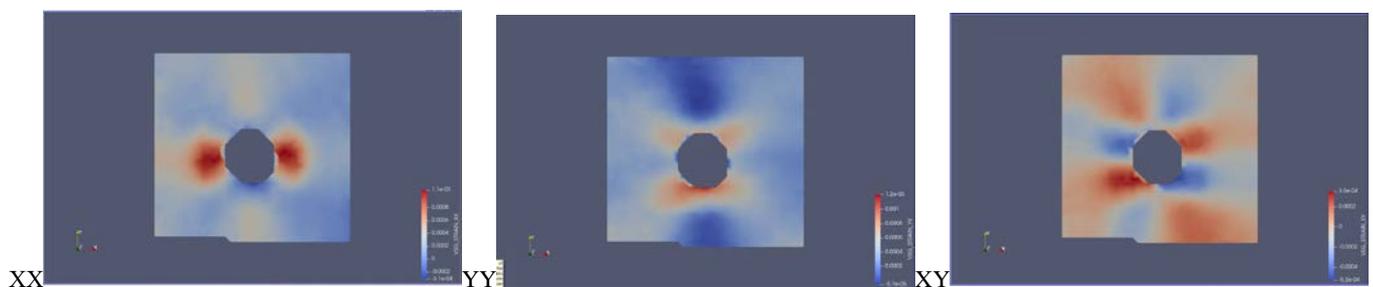
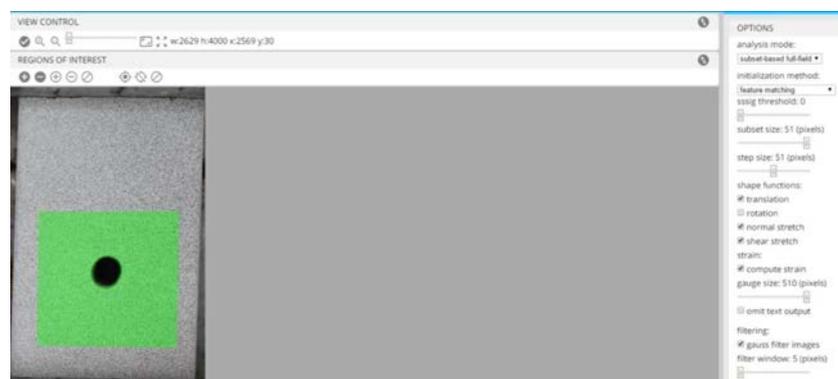


Рис. 5. Результаты DIC-анализа.

## 2.2. Идентификация остаточных напряжений

Решение обратной задачи и сопоставление экспериментального и расчетного распределения деформаций показано на рис. 6. Идентифицированные значения напряжений составляют -150 МПа (XX), -50 МПа (YY) и 3 МПа (XY). Горизонтально направление в данном случае – это направление роста образца. Интересным является тот факт, что в результате реализации такого НДС, в эксперименте наиболее ярко выраженными и интенсивными оказались деформации сдвига.

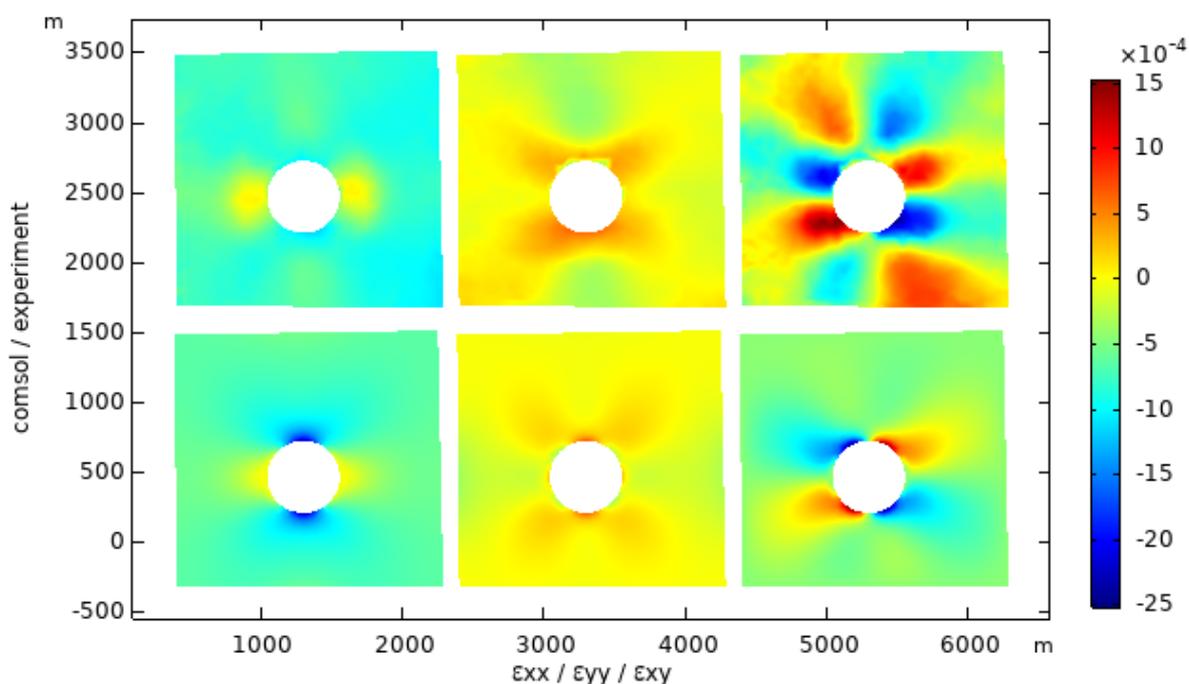


Рис. 6. Результаты решения обратной задачи. Верхний ряд рисунков – интерполяции эксперимента в COMSOL, нижний ряд – численное решение с заданными найденными остаточными напряжениями. Слева – компоненты деформаций XX, по центру – YY, справа – XY.

Для образцов, выращенных в принтере под углом 0 град. к плоскости печати, остаточные напряжения оказались очень малы, а идентифицируемое поле

деформаций содержало большое количество шумов, что помешало провести анализ результатов (рис. 7). С точки зрения принципов 3д печати, вообще говоря, в таком образце должны возникать максимальные остаточные напряжения, так как образец обладал самым большим сечением, которое штрихуется и нагревается лазером при 3д печати. Однако, полученный результат может быть объяснен тем фактом, что образец лежал на платформе на достаточно массивной подложке. В процессе его срезания с платформы, потребовалась достаточно интенсивная механическая обработка, которая могла привести к перегреву образца, частичному отпуску напряжений на его поверхности, срезанию поверхностного слоя и т.п.

Для образцов, выращенных под углом 45 градусов, был получен иной результат – несмотря на достаточно хорошую и четкую картину распределения деформаций в эксперименте (рис. 8), эти данные в COMSOL обработать не удалось. Комбинации остаточных напряжений, приемлемая для описания полученных данных, не была найдена, что может быть объяснено более сложным трехмерным остаточным НДС в образцах такого типа.

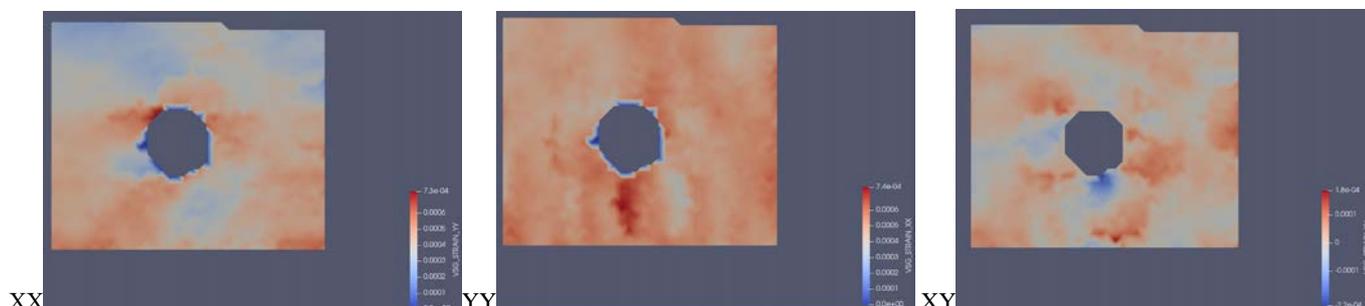


Рис. 7. Результаты DIC-анализа для образца стали, выращенного 3д печатью под углом 0 градусов к платформе принтера.

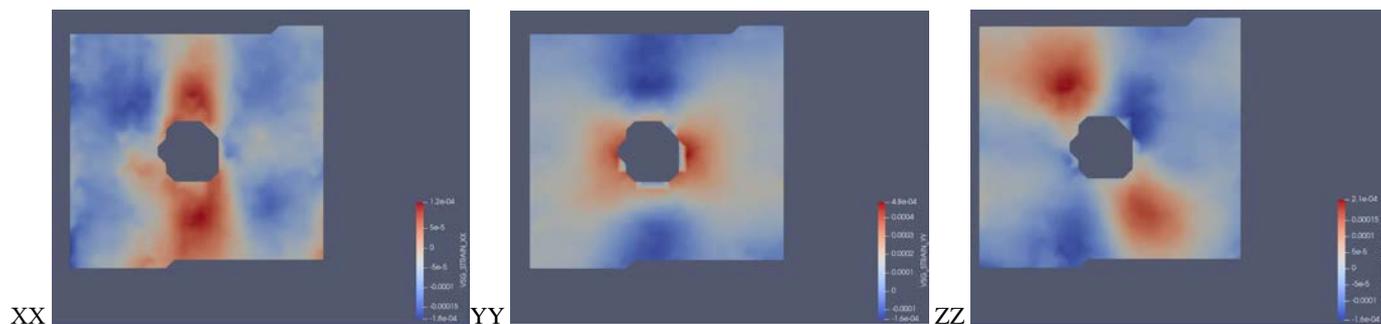


Рис. 8. Результаты DIC-анализа для образца стали, выращенного 3д печатью под углом 45 градусов к платформе принтера.

### Выводы

1. Предложен и реализован метод оценки остаточных напряжений в материалах, полученных по технологии SLM, основанный на сверлении зондирующих отверстий, применении метода корреляции цифровых изображений и решении обратной задачи.
2. Перспективными являются направления по дальнейшему увеличению разрешения фотокамеры и измельчению элементов паттерна, для возможности уменьшения базы измерения деформаций и повышения точности их идентификации вблизи края отверстия, либо наоборот, увеличение базы измерений с решением обратной задачи, фактически, только для средних деформаций с исключением зоны концентрации вблизи отверстий.
3. Отличием реализованного метода от других методов измерения деформаций вокруг зондирующих отверстий является получение полной картины для всех компонент деформаций. Одновременно с деформациями определяются перемещения, которые, вообще говоря, являются первичными данными измерений. Однако, так как вблизи границ отверстия эти перемещения определяются недостаточно точно, то

применение известных аналитических соотношений для получения значений остаточных напряжений является затруднительным.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект 20-01-00517*

### **Библиографический список**

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. - 239 с.
2. Чернышев Г.Н. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. - 240 с.
3. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции. – М.: Издательство Юрайт, 2018. - 247 с.
4. Solyaev Y., Babaytsev A. Direct observation of plastic shear strain concentration in the thick GLARE laminates under bending loading // Composites Part B: Engineering, 2021, vol. 224, no. 1, pp. 109145. DOI: [10.1016/j.compositesb.2021.109145](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109145)
5. Besnard G., Hild F., Roux S. “Finite-element” displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier // Experimental Mechanics, 2006, vol. 46, no. 6, pp. 789 - 803. DOI: [10.1007/s11340-006-9824-8](https://doi.org/10.1007/s11340-006-9824-8)
6. Roux S., Hild F. Stress intensity factor measurements from digital image correlation: Post-processing and integrated approaches // International Journal of Fracture, 2006, vol. 140, no.4, pp. 141 - 157. DOI: [10.1007/s10704-006-6631-2](https://doi.org/10.1007/s10704-006-6631-2)

7. Pan B. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review // Measurement Science and Technology, 2009, vol. 20, no. 6, pp. 062001. DOI: [10.1088/0957-0233/20/6/062001](https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001)
8. Sun Y.F., Pang J.H.L. AFM image reconstruction for deformation measurements by digital image correlation // Nanotechnology, 2006, no. 17, pp. 933 - 939. DOI: [10.1088/0957-4484/17/4/016](https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/4/016)
9. Зубов В.А., Крайский А.В., Меркин А.А., Султанов Т.Т. Корреляционная обработка двумерной оптической информации в процессе фотоэлектрической регистрации // Краткие сообщения по физике. 1978. no. 10. С. 35 - 42.
10. Wang Y., Cuitino A. M. Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlatotion // International Journal of Solids and Structures, 2002, no. 39, pp. 3777 - 3796. DOI: [10.1016/S0020-7683\(02\)00176-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00176-2)
11. Babaytsev A.V., Kuznetsova E.L., Rabinskiy L.N., Tushavina O.V. Investigation of permanent strains in nanomodified composites after molding at elevated temperatures // Periodico Tche Quimica, 2020, vol. 17, no. 34, pp. 1055 - 1065.
12. Штрикман М.М., Кашук Н.М. Определение тепловых напряжений и деформаций при фрикционной сварке трехслойных панелей из алюминиевых сплавов // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24728>
13. Рыбаулин А.Г., Сидоренко А.С. Исследование локального напряженного состояния и оценка долговечности конструкции авиационного изделия с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении // Труды МАИ. 2015. № 79. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55786>

14. Лебёдкин И.Ф., Молотков А.А., Третьякова О.Н. Математическое моделирование сложного теплообмена при разработке лазерных SLM технологий // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=97045>
15. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53682>
16. Супрапеди, Тойоока С. Пространственно-временное наблюдение пластической деформации и разрушения методом лазерной спекл-интерферометрии // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 55 - 60.
17. Pisarev V., Odintsev I., Eleonsky S., Apalkov A. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments // Optics and lasers in engineering, 2018, no. 110, pp. 437 - 456. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2018.06.022](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.06.022)
18. Волков В.И., Ньян Мин Хтет, Вей Хлэйн У, Тун Мин Лат. Определение физико-механических характеристик материалов при исследовании концентрации напряжений в образцах с отверстиями // Труды МФТИ. 2018. Т. 10. № 1. С. 68 - 74.
19. Бодрышев В.В. Анализ структуры материала по критерию – интенсивность изображения фотографии // Технология материалов. 2017. № 11. С. 8 - 12.
20. Корбуков Г.Е., Куликов В.В., Цветов Е.Р. Голография и обработка изображений / Оптический гетеродинный метод корреляционной обработки изображений. - Ленинград: Наука, 1976. С. 51 – 68.

**Method for evaluating residual stresses in AlSi10Mg alloy specimens  
obtained by SLM technology**

**Babaytsev A.V. \*, Rabinsky L.N., Yang Naing Min**

*Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe shosse,*

*Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

*\*e-mail: [Ar77eny@gmail.com](mailto:Ar77eny@gmail.com)*

## **Abstract**

Today, additive technologies are used to create physical models, prototypes, samples, tooling, and the manufacture of plastic, metal, ceramic, glass, composite and biomaterial components. Of greatest technological interest is the manufacture of final parts from metal alloys used in the aerospace industry, mechanical engineering, automotive, oil and gas, electronics, medicine and other industries. Selective laser melting (SLM) is one of the most advanced and popular 3D metal printing technology. When manufacturing products using SLM technology, complex geometric shapes, including internal cavities and channels, can be reproduced, as well as with well-thought-out design solutions - to achieve a minimum amount of machining and eliminate expensive tooling. However, as a result of powder sintering and local uneven overheating, temperature residual stresses are formed in the synthesized parts. The level of which can significantly affect the performance of the resulting products. The paper presents a variant of the method for determining residual stresses in products made of PH1 stainless steel, obtained by the SLM technology. For this, a study of residual stresses was carried out on flat rectangular samples grown in 3 directions relative to the construction plane (parallel, perpendicular and at an angle of 45 degrees to the construction platform). The method for determining residual stresses is based on determining the deformation during drilling of the probe hole and subsequent numerical calculation to determine the residual stresses. Deformations were fixed using the image

correlation method. Such a non-contact method makes it possible to determine with high accuracy the field of displacements and deformations using a drilling machine and a camera with a macro lens. The numerical calculation was carried out by the finite element method taking into account certain deformations from the experiment in the COMSOL Multiphysics environment. As a result of calculations, the distribution of residual strains and stresses was obtained for all samples for all its components. The most indicative results were obtained on a sample grown in the plane of construction.

**Keywords:** additive technologies, SLM, residual stresses, probing holes, digital image correlations.

### References

1. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* (Residual stress), Moscow, Mashgiz, 1963, 239 p.
2. Chernyshev G.N. *Ostatochnye napryazheniya v deformiruemyykh tverdykh telakh* (Residual stresses in deformable solids), Moscow, Nauka, 1996, 240 p.
3. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. *Metallurgiya. Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii* (Metallurgy. Residual stresses in metal products: a textbook for secondary vocational education), Moscow, Izdatel'stvo Yurait, 2018, 247 p.
4. Solyaev Y., Babaytsev A. Direct observation of plastic shear strain concentration in the thick GLARE laminates under bending loading, *Composites Part B: Engineering*, 2021, vol. 224, no. 1, pp. 109145. DOI: [10.1016/j.compositesb.2021.109145](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109145)

5. Besnard G., Hild F., Roux S. “Finite-element” displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier, *Experimental Mechanics*, 2006, vol. 46, no. 6, pp. 789 - 803. DOI: [10.1007/s11340-006-9824-8](https://doi.org/10.1007/s11340-006-9824-8)
6. Roux S., Hild F. Stress intensity factor measurements from digital image correlation: Post-processing and integrated approaches, *International Journal of Fracture*, 2006, vol. 140, no. 4, pp. 141 - 157. DOI: [10.1007/s10704-006-6631-2](https://doi.org/10.1007/s10704-006-6631-2)
7. Pan B. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review, *Measurement Science and Technology*, 2009, vol. 20, no. 6, pp. 062001. DOI: [10.1088/0957-0233/20/6/062001](https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001)
8. Sun Y.F., Pang J.H.L. AFM image reconstruction for deformation measurements by digital image correlation, *Nanotechnology*, 2006, no. 17, pp. 933 - 939. DOI: [10.1088/0957-4484/17/4/016](https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/4/016)
9. Zubov V.A., Kraiskii A.V., Merkin A.A., Sultanov T.T. *Kratkie soobshcheniya po fizike*, 1978, no. 10, pp. 35 - 42.
10. Wang Y., Cuitino A. M. Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlatotion, *International Journal of Solids and Structures*, 2002, no. 39, pp. 3777 - 3796. DOI: [10.1016/S0020-7683\(02\)00176-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00176-2)
11. Babaytsev A.V., Kuznetsova E.L., Rabinskiy L.N., Tushavina O.V. Investigation of permanent strains in nanomodified composites after molding at elevated temperatures, *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, no. 34, pp. 1055 - 1065.
12. Shtrikman M.M., Kashchuk N.M. *Trudy MAI*, 2011, no. 43. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24728>

13. Rybaulin A.G., Sidorenko A.S. *Trudy MAI*, 2015, no. 79. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=55786>
14. Lebedkin I.F., Molotkov A.A., Tret'yakova O.N. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=97045>
15. Chumakov D.M. *Trudy MAI*, 2014, no. 78. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53682>
16. Suprapedi, Toiooka S. Prostranstvenno-vremennoe nablyudenie plasticheskoi deformatsii i razrusheniya metodom lazernoi spekl-interferometrii, *Fizicheskaya mezomekhanika*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 55 - 60.
17. Pisarev V., Odintsev I., Eleonsky S., Apalkov A. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments, *Optics and lasers in engineering*, 2018, no. 110, pp. 437 - 456. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2018.06.022](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.06.022)
18. Volkov V.I., N'yan Min Khtet, Vei Khlein U, Tun Min Lat. *Trudy MFTI*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 68 - 74.
19. Bodryshev V.V. *Tekhnologiya materialov*, 2017, no. 11, pp. 8 - 12.
20. Korbukov G.E., Kulikov V.V., Tsvetov E.R. *Opticheskii geterodinnyi metod korrelyatsionnoi obrabotki izobrazhenii* (Optical heterodyne method for correlation image processing), Leningrad, Nauka, 1976, pp. 51 – 68.