



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-73-80>

Научная статья

Research article



Изготовление мультиматериальных образцов из сплавов ВЖ159 и БрХЦрТ В методом СЛП: численное компьютерное моделирование и экспериментальные результаты

А. В. Орлов[✉], А. В. Репнин, Э. М. Фарбер,
Е. В. Борисов, А. А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

✉ orlov_alexey88@mail.ru

Аннотация. Изготовление мультиматериальных изделий методом послойного синтеза кроет в себе множество вопросов, связанных как с технологическими параметрами и подготовкой оборудования, так и с короблениями и внутренними напряжениями получаемых деталей. В данной статье показана возможность моделирования процесса селективного лазерного плавления (СЛП) в части создания мультиматериальных деталей на примере образцов из никелевого сплава ВЖ159 и медного сплава БрХЦрТ В. Результаты численного моделирования процесса печати были верифицированы на основе изготовленных образцов. Исследуемый образец был разделен на 3 части по вертикали: нижняя и верхняя части изготавливались из сплава ВЖ159, центральная – из сплава БрХЦрТ В. Для проведения численного моделирования использовались такие же технологические параметры, как и для печати. Последовательно решались задачи термического и механического анализа для каждой из частей мультиматериального образца с передачей результатов расчета предшествующей задачи в начальные условия последующей задачи. В результате проведенного исследования установлено, что полученные результаты моделирования являются показательными, однако не совсем точно описывают деформацию образца, изготовленного методом СЛП. Численные значения деформаций, полученные по результатам моделирования, несколько меньше, чем реальные, что связано с несовершенством выбранных алгоритмов расчета. Для возможности дальнейшего использования численного компьютерного моделирования процесса выращивания мультиматериальных образцов методом СЛП необходимо реализовать непрерывный процесс моделирования, без перехода между частями образца, когда одна часть начинает рассматриваться системой как подложка. Необходим учет непрерывного изготовления образца и, соответственно, непрерывного деформирования и накопления напряжений.

Ключевые слова: мультиматериал, термический и механический анализ, моделирование процесса, селективное лазерное плавление, ВЖ159, БрХЦрТ В, деформация

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Для цитирования: Орлов А.В., Репнин А.В., Фарбер Э.М., Борисов Е.В., Попович А.А. Изготовление мультиматериальных образцов из сплавов ВЖ159 и БрХЦрТ В методом СЛП: численное компьютерное моделирование и экспериментальные результаты. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(1):73–80. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-73-80>

Simulating multi-material specimen manufacturing from VZh159 and CuCr1Zr alloys via SLM method: Computational modeling and experimental findings

A. V. Orlov[✉], A. V. Repnin, E. M. Farber,
E. V. Borisov, A. A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytekhnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

✉ orlov_alexey88@mail.ru

Abstract. Manufacturing of multi-material products through layer-by-layer synthesis poses various challenges encompassing process parameter optimization, equipment calibration, and the mitigation of warping and internal stresses within the manufactured parts. The article investigates the feasibility of simulating the selective laser melting (SLM) process for manufacturing multi-material components, exemplified through specimens composed of the VZh159 nickel alloy and CuCr1Zr copper alloy. The study entails numerical simulations of the printing process, which were then validated against real specimens produced through SLM. Each test specimen was vertically divided into three parts: the top and bottom sections consisted of the VZh159 alloy, while the central part was composed of the CuCr1Zr alloy. Simulations involved using identical process parameters as employed in the printing process. Thermal and mechanical analyses for each part of the multi-material specimen were sequentially addressed, transferring the outcomes of the preceding analysis as initial conditions for subsequent calculations. The study concludes that while the obtained simulation results are indicative, they do not precisely capture the deformation observed in the specimens manufactured via the SLM method. The numerical values of deformations derived from simulation results slightly underestimate the actual deformations, attributed to limitations in the chosen calculation algorithms. For future utilization of numerical computer simulation in the SLM manufacturing of multi-material specimens, the study suggests the necessity of implementing a seamless, continuous simulation process without transitions between different parts of the specimen. This entails considering the entire manufacturing process without segregating sections, ensuring a comprehensive account of continuous deformation and stress accumulation throughout fabrication.

Keywords: multi-material, thermal and mechanical analysis, simulation of the process, selective laser melting, VZh159, CuCr1Zr, deformation

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

For citation: Orlov A.V., Repnin A.V., Farber E.M., Borisov E.V., Popovich A.A. Simulating multi-material specimen manufacturing from VZh159 and CuCr1Zr alloys via SLM method: Computational modeling and experimental findings. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(1):73–80. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-73-80>

Введение

На сегодняшний день многие высокотехнологичные инженерные задачи требуют применения изделий из металлов и сплавов с улучшенными и индивидуальными специфическими свойствами, которые невозможно достичь при использовании единого состава материала на всем протяжении изделия [1]. В решении таких задач могут помочь мультиматериалы – это включение в состав изделия нескольких материалов или сплавов, что позволяет объединять их свойства или обеспечивать точечное распределение последних для достижения требуемых качеств (локальная износостойкость, высокая теплопроводность, теплоизоляция, стойкость к химической коррозии и т.д.) в определенных местах изделия или детали [2].

В классификацию мультиматериалов входят такие композиции, как полимер–металл, металл–металл (би-

металл), металл–керамика и др. [3]. Биметаллические изделия представляют собой комбинации двух металлов или сплавов, которые могут быть получены путем соединения указанных материалов с помощью сварки или пайки, что позволяет устранить их недостатки, сохраняя при этом желаемые свойства каждого из них [4]. Например, медные сплавы (GRCop-84) обладают очень высокой теплопроводностью для более быстрого охлаждения, прочностью при повышенных температурах с низким тепловым расширением и значительной стойкостью к окислению, что позволяет использовать их в камерах сгорания и сопловых втулках регенеративно-охлаждаемых ракетных двигателей (футеровка сопла), а также в областях с высокотемпературными потоками газов [5; 6]. В свою очередь, сплавы на основе никеля (например, Inconel 718) представляют собой устойчивые к высокотемпературной коррозии материалы,

применяемые в аэрокосмической промышленности, особенно в газотурбинных и ракетных двигателях, ввиду высокой прочности на растяжение и на разрыв наряду со стойкостью к окислению при повышенных температурах. Однако данные сплавы обладают низкой теплопроводностью [7; 8]. Соответственно, нанесение медных сплавов на никелевые (типа Inconel 718 или его аналоги) позволит улучшить теплопроводность изделий при сохранении их прочностных характеристик [5].

Для создания указанных изделий возможно применение как классических технологий, так и аддитивных с возможностью изготовления изделий со сложной (развитой) геометрией [1; 3]. На текущий момент уже имеются научные работы, описывающие особенности получения биметаллических и функционально-градиентных изделий типа «никелевый сплав – медный сплав» (In718–Cu; In718–GRCop-84) как с помощью процесса прямого подвода энергии и материала [5; 6; 9], так и с использованием процессов синтеза на подложке – например, селективного лазерного плавления (СЛП) [10; 11]. Процесс СЛП обладает большим количеством параметров, влияющих на результирующие свойства и наличие внутренних напряжений и дефектов в получаемых изделиях и материалах [12–14]. Отработка параметров процесса для достижения наилучших результатов является важной незаменимой частью процесса выращивания изделий [15]. Использование численного компьютерного моделирования позволяет снизить длительность отработки и уменьшить стоимость возможных ошибок, в особенности при получении изделий со сложной геометрией [16–18].

На сегодняшний день моделирование процесса СЛП представлено достаточно широко [14; 16; 17; 19], однако предложенные работы не охватывают вопросы моделирования изготовления изделий из мультиматериалов, в частности биметаллических изделий. Соответственно, для дальнейшего развития и эффективного применения аддитивных технологий в получении биметаллических изделий/деталей различного назначения необходимо рассмотреть возможность моделирования процесса СЛП таких изделий.

Цель данной работы – проведение численного компьютерного моделирования процесса изготовления мультиматериальных образцов из никелевого сплава ВЖ159 и медного сплава БрХЦрТ В методом СЛП и верифицирование полученных результатов на основе изготовленных образцов.

Использованные материалы и методы

Численное компьютерное моделирование процесса выращивания мультиматериальных образцов методом СЛП реализовано с помощью пакета конечно-

элементного анализа «ANSYS Workbench 2019 R2» с использованием модулей «Transient Thermal» и «Static Structural» [20]. Модель образца с указанием материала каждой из трех его частей (верхней, средней и нижней) представлена на рис. 1. Для реализации моделирования проводилось последовательное решение термомеханической задачи для каждой части образца – сначала термической задачи (в модуле «Transient Thermal»), потом механической (в модуле «Static Structural»). Блок-схема численного компьютерного моделирования представлена на рис. 2.

В ходе моделирования процесса выращивания изделия методом СЛП применялись следующие параметры этого процесса: для сплава ВЖ159 – мощность лазера 275 Вт, скорость сканирования 760 мм/с, расстояние между проходами лазера 0,1 мм, толщина слоя 0,05 мм; для сплава БрХЦрТ В – мощность лазера 400 Вт, скорость сканирования 300 мм/с, расстояние между проходами лазера 0,15 мм, толщина слоя 0,05 мм. Физико-механические свойства сплавов, используемых в процессе моделирования, представлены в таблице.

Для изготовления образцов биметаллических материалов применяли сферические порошки сплава ВЖ159 (квантили распределения $d_{10} = 17$ мкм, $d_{50} = 32$ мкм, $d_{90} = 55$ мкм) и сплава БрХЦрТ В ($d_{10} = 14$ мкм, $d_{50} = 29$ мкм, $d_{90} = 52$ мкм). СЭМ-изображения частиц этих порошков представлены на рис. 3.

Изготовление образцов осуществлялось в инертной газовой атмосфере с помощью установки SLM280HL (SLM Solutions GmbH, Германия), оснащенной иттербиевым волоконным лазером с длиной волны 1070 нм, максимальной мощностью 400 Вт, минимальным диаметром лазерного луча 80 мкм и максимальной скоростью сканирования 15 м/с. Верхние и нижние части образцов изготавливались из ВЖ159, средние – из БрХЦрТ В.

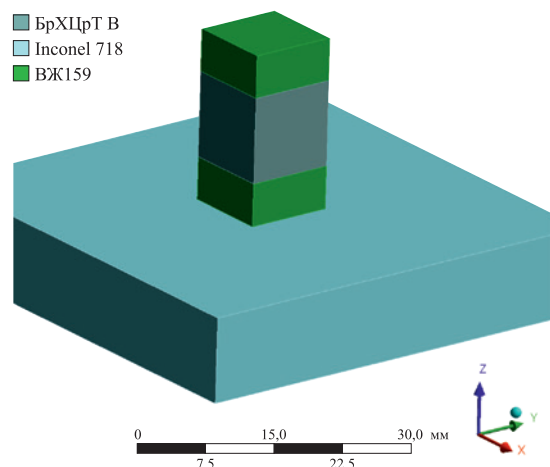


Рис. 1. Исходная модель мультиматериального образца

Fig. 1. Initial design of the multi-material specimen

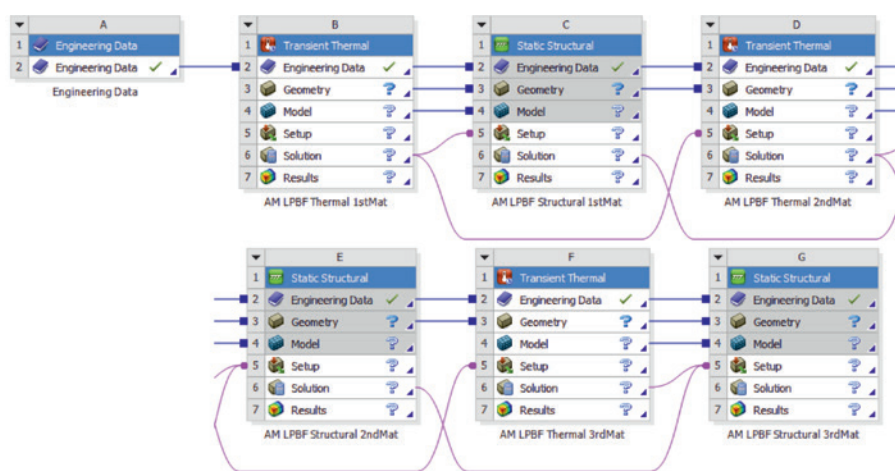


Рис. 2. Блок-схема численного компьютерного моделирования изготовления мультиматериальных образцов

Fig. 2. Block diagram of computer simulation for manufacturing multi-material specimens

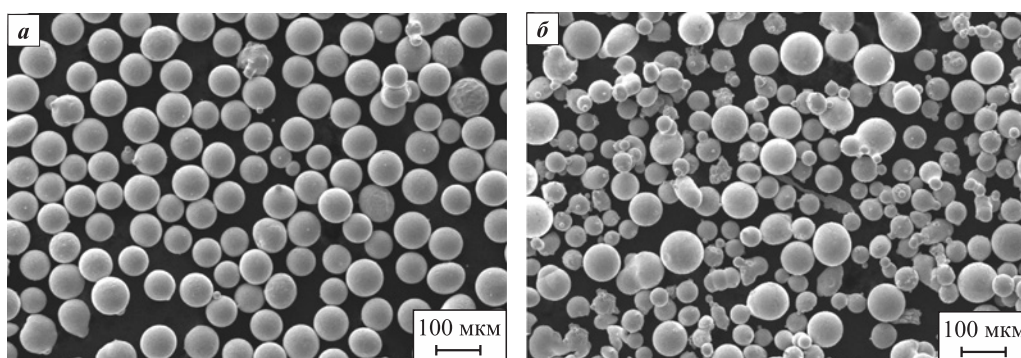


Рис. 3. СЭМ-изображения используемых в исследовании порошков сплавов БрХЦрТ В (а) и ВЖ159 (б)

Fig. 3. SEM image of CuCr1Zr (a) and VZh159 (b) alloy powders used in the study

Физико-механические свойства моделируемых сплавов

Physical and mechanical properties of modeled alloys

Сплав	Температура, °С	Плотность, кг·м ³	Коэффициент температурного расширения, 10 ⁻⁵ °С ⁻¹	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Упругость	
						Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
ВЖ159	25	8,43	11,47	11,01	0,39	213,18	0,31270
	100	8,41	11,82	12,19	0,41	208,37	0,31473
	500	8,27	13,85	18,38	0,47	180,35	0,32554
	1000	8,04	16,41	26,03	0,56	139,68	0,33905
	1100	7,99	16,92	27,55	0,71	130,79	0,34175
	1350	7,65	25,68	27,67	0,69	—	—
	2000	7,09	31,97	35,97	0,76	—	—
БрХЦрТ В	25	8,93	16,34	92,97	0,01	129,53	0,34903
	100	89,00	16,59	101,86	0,01	125,96	0,35319
	500	8,71	18,15	134,91	0,01	101,42	0,37662
	1000	8,43	20,40	162,42	0,01	57,78	0,40650
	1100	8,10	35,51	160,79	5,17	—	—
	1350	7,76	38,22	167,71	0,50	—	—
	2000	7,18	41,26	180,12	0,50	—	—

Визуальный анализ полученных образцов проводился с помощью светового оптического микроскопа «Leica DMI 5000» (Leica Microsystems, Германия). Резку образцов выполняли электроэрозионным методом.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлены результаты моделирования процесса изготовления мультиматериальных образцов методом СЛП – поля деформаций образца, определяемые по оси Y . Хорошо видно, что происходит деформирование сторон образца вовнутрь. Максимальная деформация составила 83 мкм.

Можно отметить, что наибольшему деформированию подвержена середина образца, изготовленная из БрХЦрТ В. Также наблюдаются сильные деформации верхней части образца, выполненной из ВЖ159, в особенности на границах раздела материалов.

На рис. 5 приведены результаты моделирования – определяемые поля напряжений после изготовления мультиматериальных образцов методом СЛП. Наибольшие значения напряжений наблюдаются на углах образца на границах раздела, где они составляют около 900 МПа. Отмечается наличие повышенных значений напряжений (400–500 МПа) для верхней части образца, изготовленной из ВЖ159.

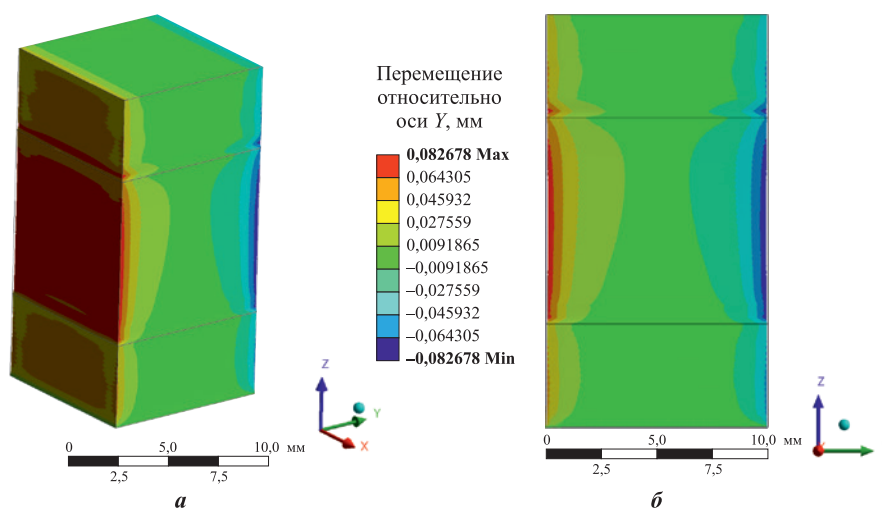


Рис. 4. Результаты моделирования процесса изготовления мультиматериального образца – его деформации по оси Y
 a – общий вид, b – вид в плоскости X

Fig. 4. Results of simulating of multi-material specimen manufacturing – specimen deformation along the Y axis
 a – general view, b – view in the X plane

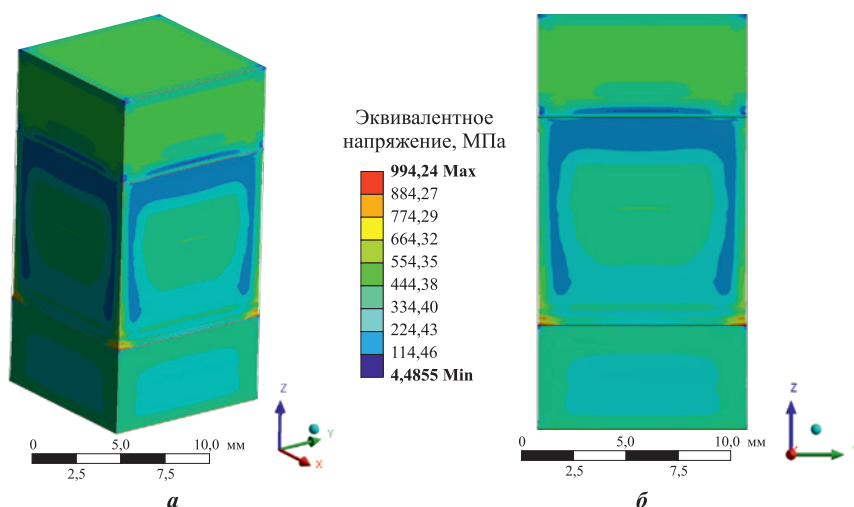


Рис. 5. Результаты моделирования процесса изготовления мультиматериального образца – напряжения образца
 a – общий вид, b – вид в плоскости X

Fig. 5. Results of simulating of multi-material specimen manufacturing – specimen stress
 a – general view, b – view in the X plane

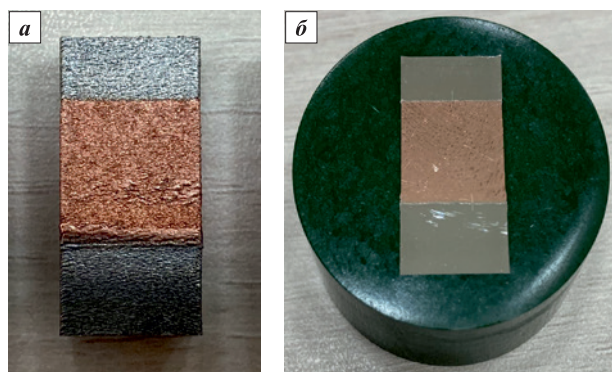


Рис. 6. Изготовленный мультиматериальный образец (а) и подготовленный шлиф образца (б)

Fig. 6. Manufactured multi-material specimen (a) and thin section prepared from the specimen (b)

Наименьшие значения напряжений составили не более 100 МПа.

На рис. 6 представлены мультиматериальные образцы, изготовленные методом СЛП. При визуальном осмотре серьезных деформаций или дефектов (трещин, разрушений) обнаружено не было.

На рис. 7 показана верификация моделирования деформации образца, полученного методом СЛП, на границе раздела между верхней его частью (из ВЖ159) и средней (из БрХЦрТ В).

Видно (рис. 7, а), что деформации на границе раздела верхней и средней частей образца при моделировании составили 64–83 мкм. При этом изгиб идет вовнутрь у верхней и средней частей образца по отдельности, двумя участками. У экспериментально изготовленного методом СЛП образца (рис. 7, б) деформации на границе раздела составили около 100 мкм, что несколько превышает полученные при моделировании значения (наибольшее отклонение – 36 мкм). Наблюдается изгиб вовнутрь с максимальной деформацией вблизи границы раздела, в основном в средней части образца, изготовленной из БрХЦрТ В.

Различие между результатами моделирования и экспериментальными данными может быть связано с особенностью расчетов при моделировании: после начала расчета изготовления верхней части образца из ВЖ159 его средняя часть уже не участвует в определении напряжений и деформаций, поскольку система рассматривает ее как подложку. Это создает определенные ограничения в получаемых значениях напряжений и деформаций. Можно предположить, что различный характер деформирования образцов, когда моделируемый образец деформировался в двух отдельных участках, обусловлен непосредственно вышеописанным явлением. Это является определенным ограничением возможности использования моделирования процесса изготовления мультиматериалов методом СЛП.

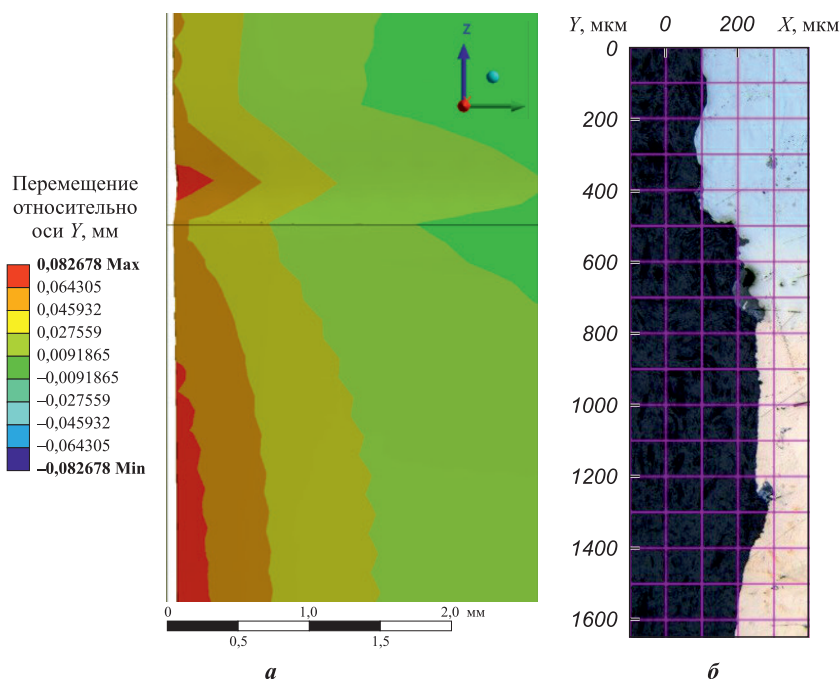


Рис. 7. Верификация моделирования деформации мультиматериального образца, изготовленного методом СЛП, на границе раздела между верхней и средней частями из сплавов соответственно ВЖ159 и БрХЦрТ В

а – результаты моделирования, б – экспериментально изготовленный образец

Fig. 7. Validation of deformation simulation at the interface between the top and middle parts of the VZh159 and CuCr1Zr alloys in the multi-material specimen produced by SLM

а – simulation results, б – experimental specimen

В то же время полученные при моделировании значения деформаций в целом достаточно показательны и близки к экспериментальным значениям. Однако для более сложных конструкций необходима оптимизация системы для более точного соответствия реальным результатам.

Выводы

В результате выполнения работы проведено численное компьютерное моделирование процесса изготовления мультиматериальных образцов из никелевого сплава ВЖ159 и медного сплава БрХЦрТВ и осуществлено верифицирование полученных результатов. На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Полученные результаты моделирования являются показательными, однако не совсем точно описывают деформацию образца, изготовленного методом СЛП. Численные значений деформаций по результатам моделирования (64–83 мкм) несколько меньше, чем реальные (около 100 мкм), что связано с несовершенством выбранных алгоритмов расчета, когда после начала расчета изготовления верхней части образца средняя его часть уже не участвует в расчете и воспринимается системой как подложка.

2. Для возможности дальнейшего использования численного компьютерного моделирования процесса выращивания мультиматериальных образцов методом СЛП необходимо реализовать непрерывный процесс моделирования, без перехода между частями образца, когда одна его часть начинает рассматриваться системой как подложка. Необходим учет непрерывного изготовления образца и, соответственно, непрерывного деформирования и накопления напряжений.

Список литературы / References

1. Bandyopadhyay A., Zhang Y., Onuik B. Additive manufacturing of bimetallic structures. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17(2):256–294. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2040738>
2. Wang D., Liu L., Deng G., Deng C., Bai Y., Yang Y., Wu W., Chen J., Liu Y., Wang Y., Lin X., Han C. Recent progress on additive manufacturing of multi-material structures with laser powder bed fusion. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17(2):329–365. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2028343>
3. Nazir A., Gokcekaya O., Md Masum Billah K., Ertugrul O., Jiang J., Sun J., Hussain S. Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*. 2023;226:111661. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>
4. Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A. Review on additive manufacturing of multi-material parts: progress and challenges. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022;6(1):4. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>
5. Onuik B., Heer B., Bandyopadhyay A. Additive manufacturing of Inconel 718–Copper alloy bimetallic structure using laser engineered net shaping (LENS™). *Additive Manufacturing*. 2018;21:133–140. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.007>
6. Balkan M.E., Aydoğan E., Işık M., Derin B., Koç B. Directed energy deposition process development for functionally gradient Copper–Inconel 718 materials. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*. 2021;1(3):581–581. <https://doi.org/10.18416/JAMTECH.2111581>
7. Ghorbanpour S., Alam M.E., Ferreri N.C., Kumar A., McWilliams B.A., Vogel S.C., Bicknell J., Beyerlein I.J., Knezevic M. Experimental characterization and crystal plasticity modeling of anisotropy, tension-compression asymmetry, and texture evolution of additively manufactured Inconel 718 at room and elevated temperatures. *International Journal of Plasticity*. 2020;125:63–79. <https://doi.org/10.1016/j.iijplas.2019.09.002>
8. Popovich A.A., Sufiarov V.S., Polozov I.A., Borisov E.V. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment. *Key Engineering Materials*. 2015;651–653:665–670. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.665>
9. Onuik B., Bandyopadhyay A. Bond strength measurement for additively manufactured Inconel 718–GRCop84 copper alloy bimetallic joints. *Additive Manufacturing*. 2019;27:576–585. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.003>
10. Marques A., Cunha Â., Gasik M., Carvalho O., Silva F.S., Bartolomeu F. Inconel 718–copper parts fabricated by 3D multi-material laser powder bed fusion: a novel technological and designing approach for rocket engine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;122(3-4):2113–2123. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10011-x>
11. Walker J., Middendorf J.R., Lesko C.C.C., Gockel J. Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing in 3-dimensions. *Manufacturing Letters*. 2022;31:74–77. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.011>
12. Papazoglou E.L., Karkalos N.E., Karmiris-Obratański P., Markopoulos A.P. On the modeling and simulation of SLM and SLS for metal and polymer powders: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022;29:941–973. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09601-x>
13. Wei C., Zhang Z., Cheng D., Sun Z., Zhu M., Li L. An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: from macro- to micro-scales. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2021;3(1):012003. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/abce04>
14. Song X., Feih S., Zhai W., Sun C.N., Li F., Maiti R., Wei J., Yang Y., Oancea V., Romano Brandt L., Korsunsky A.M. Advances in additive manufacturing process simulation: Residual stresses and distortion predictions in complex metallic components. *Materials & Design*. 2020;193:108779. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108779>
15. Nandhakumar R., Venkatesan K. A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness. *Materials*. 2023;16(1):1–15. <https://doi.org/10.3390/ma16010001>

- rials Today Communications*. 2023;35:105538.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105538>
16. Gh Ghanbari P., Mazza E., Hosseini E. Adaptive local-global multiscale approach for thermal simulation of the selective laser melting process. *Additive Manufacturing*. 2020; 36:101518. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101518>
 17. Zhou R., Liu H., Wang H. Modeling and simulation of metal selective laser melting process: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;121(9-10):5693–5706.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-09721-z>
 18. Bouabbou A., Vaudreuil S. Understanding laser-metal interaction in selective laser melting additive manufacturing through numerical modelling and simulation: A review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17(3):543–562.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2052488>
 19. Laakso P., Riipinen T., Laukkanen A., Andersson T., Jokinen A., Revuelta A., Ruusuvaori K. Optimization and simulation of SLM process for high density H13 tool steel parts. *Physics Procedia*. 2016;83:26–35.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.004>
 20. Nagesha B.K., Anand Kumar S., Vinodh K., Pathania A., Barad S. A thermo-mechanical modelling approach on the residual stress prediction of SLM processed HPNGV aeroengine part. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44: 4990–4996. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.940>

Сведения об авторах

Алексей Валерьевич Орлов – научный сотрудник лаборатории «Дизайн материалов и аддитивного производства» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)

 **ORCID:** 0000-0002-0090-0442

 **E-mail:** orlov_alexey88@mail.ru

Арсений Вячеславович Репнин – инженер лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций» СПбПУ

 **ORCID:** 0009-0001-3157-3317

 **E-mail:** repnin_arseniy@mail.ru

Эдуард Михайлович Фарбер – инженер лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций» СПбПУ

 **ORCID:** 0009-0007-8830-9887

 **E-mail:** d.farber2010@yandex.ru

Евгений Владиславович Борисов – к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций» СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0003-2464-6706

 **E-mail:** evgenii.borisov@icloud.com

Анатолий Анатольевич Попович – д.т.н., профессор, директор Института машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0002-5974-6654

 **E-mail:** popovicha@mail.ru

Information about the Authors

Aleksei V. Orlov – Researcher, Laboratory “Design of materials and additive manufacturing”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

 **ORCID:** 0000-0002-0090-0442

 **E-mail:** orlov_alexey88@mail.ru

Arseniy V. Repnin – Engineer, Laboratory “Synthesis of new materials and structures”, SPbPU

 **ORCID:** 0009-0001-3157-3317

 **E-mail:** repnin_arseniy@mail.ru

Eduard M. Farber – Engineer, Laboratory “Synthesis of new materials and structures”, SPbPU

 **ORCID:** 0009-0007-8830-9887

 **E-mail:** d.farber2010@yandex.ru

Evgeniy V. Borisov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory “Synthesis of new materials and structures”, SPbPU

 **ORCID:** 0000-0003-2464-6706

 **E-mail:** evgenii.borisov@icloud.com

Anatoly A. Popovich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Machinery, Materials, and Transport, SPbPU

 **ORCID:** 0000-0002-5974-6654

 **E-mail:** popovicha@mail.ru

Вклад авторов

А. В. Орлов – проведение экспериментов, обработка полученных результатов, участие в обсуждении результатов, формирование выводов исследования.

А. В. Репнин – проведение экспериментов, обработка полученных результатов, написание статьи, участие в обсуждении результатов.

Э. М. Фарбер – критический анализ литературы, написание статьи, участие в обсуждении результатов.

Е. В. Борисов – планирование экспериментов, изготовление образцов, участие в обсуждении результатов.

А. А. Попович – концептуализация идеи, определение цели работы и ее задач, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the Authors

A. V. Orlov – conducted experiments, processed experimental data, contributed to result analysis and discussion, drew conclusions from the study.

A. V. Repnin – conducted experiments, processed experimental data, authored the manuscript, contributed to result analysis and discussion.

E. M. Farber – conducted critical literature analysis, contributed to manuscript writing, participated in result analysis and discussion.

E. B. Borisov – planned and executed experiments, handled specimen manufacturing, contributed to result analysis and discussion.

A. A. Popovich – developed key conceptual ideas, outlined the study's objectives, contributed to result analysis and discussion.

Статья поступила 28.06.2023 г.
Доработана 19.10.2023 г.
Принята к публикации 23.10.2023 г.

Received 28.06.2023
Revised 19.10.2023
Accepted 23.10.2023