

**Исследование деформированного состояния деталей, изготовленных методом селективного лазерного спекания из жаропрочного никелевого сплава**

А. Б. Мазалов, Д. П. Шматов, А. С. Пустовалов, Е. А. Кишов, И. И. Морозов

*В работе проведено качественное и количественное сравнение отклонения формы образцов, изготовленных методом SLM (Selective Laser Melting – селективное лазерное сплавление), измеренного при помощи 3D-сканирования и рассчитанного на основе конечно-элементного моделирования в системе ANSYS Additive. Исследование проведено на примере трёх образцов из жаропрочного сплава на никелевой основе 08ХН53БМТЮ – российского аналога Inconel 718. Оценка перемещений осуществлялась как на платформе построения после выращивания, так и после отделения от неё. Сопоставление экспериментальных и расчётных данных перемещений контрольных точек образцов показало достаточную для практических целей точность расчетной модели, построенной на базе технологий компьютерного моделирования ANSYS Additive.*

**Ключевые слова:** селективное лазерное сплавление, жаропрочный никелевый сплав, моделирование 3D-печати, метод конечных элементов, динамический термомеханический расчёт, 3D-сканирование, ANSYS Additive.

**Ссылка:** Мазалов А. Б., Шматов Д. П., Пустовалов А. С., Кишов Е. А., Морозов И. И. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 578.

**Reference:** A. B. Mazalov, D. P. Shmatov, A. S. Pustovalov, E. A. Kishov, and I. I. Morozov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (6), 578 (2019).

**Введение**

Аддитивные технологии сегодня – одно из наиболее динамично развивающихся направлений цифрового производства. Они входят в перечень технологий 6-го технологического

уклада и в список ключевых направлений технологического развития, содержащихся в стратегии инновационного развития экономики России. Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, но объединяет их одно: построение модели происходит путем добавления материала (от англ. add – «добавлять») в соответствии с конфигурацией 3D-модели [1, 2], в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления «лишнего» материала.

Двигателестроение является той отраслью, где аддитивные технологии находят все новые и новые применения. Это обусловлено несколькими факторами.

1. Снижение массы конечного изделия за счет повышения функциональности размещения материала или снижения количества деталей. Снижение массы двигательной установки существенно повышает эксплуатационные характеристики летательного аппарата.

Мазалов Алексей Борисович<sup>1</sup>, генеральный директор.  
Шматов Дмитрий Павлович<sup>2</sup>, доцент, к.т.н.  
Пустовалов Алексей Сергеевич<sup>1</sup>, инженер.  
Кишов Евгений Алексеевич<sup>3</sup>, инженер.  
Морозов Илья Игоревич<sup>3</sup>, директор филиала.

<sup>1</sup> АО «Центр АТ».

Россия, 394056, г. Воронеж, ул. Солдатское поле, 285/5.

E-mail: aleksey.pustovalov@vselmash.ru

<sup>2</sup> Воронежский Государственный Технический Университет.

Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

<sup>3</sup> АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» (филиал в ПФО).

Россия, 443013, г. Самара, Московское шоссе, 17.

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2019 г.

© Мазалов А. Б., Шматов Д. П., Пустовалов А. С., Кишов Е. А., Морозов И. И., 2019

2. Снижение затрат на производство. Элементы ГТД и ЖРД имеют сложную геометрию, для их изготовления требуется дорогостоящая оснастка и большое количество ручного труда. Весьма существенный выигрыш можно получить на стадии ОКР за счет уменьшения сроков изготовления опытных образцов и уменьшения времени простоя конструкторского подразделения.

Немаловажным является возможность получения мультипликативного эффекта, когда изготовление конструкций, полученных только аддитивными технологиями (АТ), приводит к такому увеличению удельных параметров изделия, которые перекрывают затраты на стоимость изготовления.

Целью данной работы является численно-экспериментальное исследование деформированного состояния образцов из жаропрочного никелевого сплава 08ХН53БМТЮ, изготовленных по технологии SLM (Selective Laser Melting – селективное лазерное сплавление, т.е. технология производства изделий посредством лазерного плавления металлического порошка), причём с использованием возможностей программного обеспечения ANSYS Workbench Additive и данных 3D-сканирования.

### Параметры процесса 3D-печати. Материал образцов

В данной статье для производства экспериментальных исследуемых образцов использовалась установка SLM 280HL, работающая по SLM-технологии применительно к металлопорошковым композициям [3, 4]. Данный

промышленный принтер пригоден для создания объектов сложной геометрической формы, зачастую с тонкими стенками и внутренними полостями.

Технология печати SLM подразумевает собой разделение модели детали в программном обеспечении на множество слоев, затем практическое формирование слоев на подложке и сплавление каждого слоя источником лазерного излучения в инертной или нейтральной газовой среде. В качестве защитных газов обычно используется аргон или азот высокой степени чистоты.

Установка оснащена рабочей камерой с размерами 280×280×350 мм, минимальная толщина наносимого слоя составляет 20 мкм, в среднем 30–50 мкм.

Измерения исследуемых экспериментальных образцов осуществлялись с использованием промышленного сканера BREUCKHMAN SMARTSCAN 3D с предельным разрешением 6 мкм.

В качестве основных материалов для построения образцов используется жаропрочный никелевый сплав ПР-08ХН53БМТЮ, российский аналог Inconel 718 [5]. Химический состав данного материала приведен в таблице.

Сплав ПР-08ХН53БМТЮ обладает высокой стойкостью к коррозии, высокой прочностью, достаточной свариваемостью, высокой динамической способностью выдерживать температурные нагрузки до 700 °С. Области применения – атомная промышленность, двигателестроение (в двигателях, турбинах, реакторах), космонавтика, ядерная энергетика, а также в инструментах.

Таблица

Химический состав порошка сплава ПР-08ХН53БМТЮ, %

Fe	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Mn	Co	Si	S	P	Cu	B	O <sub>2</sub>
Ост.	53,1	18,0	5,05	3,15	0,75	0,26	0,19	0,09	0,34	0,007	0,02	0,15	0,09	0,053

### Методы и средства численного моделирования 3D-печати

В основе методики моделирования процесса 3D-печати в ANSYS Additive лежит метод конечных элементов. Модуль ANSYS Additive соединяет в себе точный и проверенный десятилетиями решатель в области меха-

ники деформируемого твёрдого тела и теплопередачи, причём со специализированной базой материалов для аддитивной печати, специализированными визардами, начальными и граничными условиями и другими настройками, направленными на выполнение точного моделирования процесса SLM.

При моделировании 3D-печати металлом необходимо тем или иным образом решить проблему пространственно-временных масштабов взаимодействия лазерного излучения с материалом. Так, например, размеры «пятна» лазерного луча на поверхности детали имеют нанометровый порядок, в то время как размеры изготавливаемых конструкций измеряются в сантиметрах и десятках сантиметров (т. н. проблема пространственных масштабов). Аналогичная ситуация и с временным масштабом: нанесение одного слоя занимает доли секунды, тогда как весь процесс печати занимает часы (проблема временных масштабов). Поэтому методика расчёта предполагает использование подробной модели, учитывающей реальную траекторию движения лазера и рассчитываемой в постановке с подвижным источником тепла, но лишь для небольших фрагментов конструкции. А для моделирования выращивания изделия целиком применяется т. н. «метод объединённого слоя». Суть его состоит в том, что по толщине одного конечного элемента располагаются сразу несколько физических слоёв порошка.

Такой подход позволяет, экономно расходуя вычислительные ресурсы, получить напряжённо-деформированное состояние изделия в целом и оценить искажение его формы. Реализация метода включает в себя использование технологии «рождения и смерти» элементов, встроенной в ANSYS [6]. В контексте моделирования аддитивного процесса «включение» элементов осуществляется послойно. При этом «атрибут существования» элементов, а также граничные условия (например, конвекции) обновляются на каждой итерации расчёта.

Расчёт металлической 3D-печати связан с проведением динамического термомеханического анализа. Уравнение, описывающее переходный процесс распространения тепла в твёрдом теле и записанное относительно неизвестных температур в узлах конечно-элементной сетки, имеет вид [7]:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K_t]\{T\} = \{Q\}, \quad (1)$$

где  $[C]$  – матрица удельной теплоёмкости,  $[K_t]$  – матрица проводимости,  $\{Q\}$  – вектор теплового потока,  $\{T\}$  – вектор узловых тем-

ператур. Точкой обозначено дифференцирование по времени. Поведение распечатываемого изделия как объекта механики деформируемого тела в дискретном представлении хорошо описывается стационарной моделью ввиду пренебрежимо малых скоростей и ускорений его точек [8]:

$$[K_{st}]\{u\} = \{F_{st}\} + \{F_t\}, \quad (2)$$

где  $[K_{st}]$  – матрица жёсткости,  $\{F_{st}\}$  – вектор механических нагрузок (например, от преднатяга болтов, крепящих платформу построения),  $\{F_t\}$  – вектор температурных нагрузок. Компоненты последнего определяются коэффициентом линейного температурного расширения материала и перепадом температур.

Строго говоря, уравнения (1) и (2) должны решаться совместно. Это позволяет учитывать взаимное влияние поля температур и поля перемещений, когда, например, тепловая задача считается не на исходной, а на деформированной сетке. Однако такой подход сопряжён с известными вычислительными затратами, т. к. фактически на каждом шаге интегрирования по времени добавляется внутренний цикл поиска равновесного состояния связанной термомеханической системы. Поэтому в ANSYS Additive применяется более простой подход, основанный на т. н. односторонней связке теплового и механического расчётных блоков. Здесь сначала полностью решается тепловая задача на «неподвижной» сетке, а затем – механическая задача. Решение последней состоит из серии расчётов, на каждом из которых «включается» очередной слой конечных элементов, и конструкция в соответствующий момент времени нагружается полем температур, взятого с уже проведённого теплового анализа [9, 10].

Отметим также подход ANSYS Additive в части моделирования подвода мощности источника тепла (в данном случае – лазерного луча). Кажущийся на первый взгляд очевидным способ имитации в модели физического времени наталкивается на трудность, связанную со значительной погрешностью температурного поля – а это является критичным с точки зрения достоверности прогнозирования температурных деформаций.

Причина в таком отклонении значений температур от эксперимента кроется здесь в

накоплении погрешности, обусловленной неизбежной (пусть и небольшой) неточностью в задании мощности источника тепла. Данный подход позволяет достаточно точно прогнозировать время печати, однако не обеспечивает сколько-нибудь достоверную оценку напряжённно-деформированного состояния изделия.

В ANSYS Additive применяется другой способ. Подвод энергии в модели осуществляется путём поддержания на определённое время на внешней поверхности очередного «включённого» слоя известной температуры, а именно – температуры плавления металла (см. рис. 1).

Реальность:

1 слой:	$Q, \Delta t$	$E = Q \times \Delta t$
100 слоёв:	$Q, \Delta t$	$E = 100 \times Q \times \Delta t$

Модель:

1 слой:	$\Delta T$	$E = \Delta T \times V \times c \times \rho$
2 слоя:	$\Delta T$	$E = 2 \times \Delta T \times V \times c \times \rho$

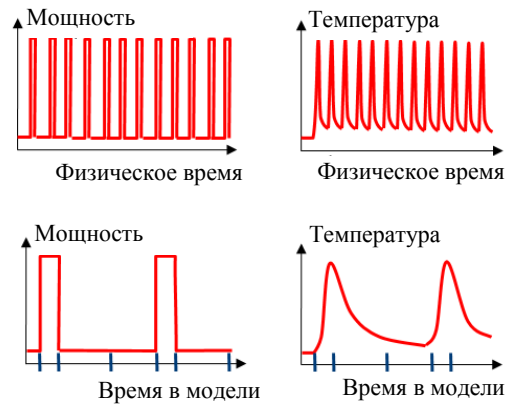


Рис. 1. Способ моделирования подвода тепловой энергии, используемый в ANSYS Additive.

Тем самым время в модели теряет связь со временем физическим, однако становится возможным прогнозирование остаточных напряжений и искажения формы детали с достаточной для практики точностью, что, на наш взгляд, представляется более существенным.

Используемая в расчётах модель материала соответствует сплаву Inconel 718 и взята из библиотеки аддитивных материалов ANSYS. Данная модель включает в себя характеристики упругости и пластичности, теплофизические свойства, а также их температурные зависимости.

### Сравнение данных 3D-сканирования с результатами расчёта

#### Пятиопорная балка

Геометрия образца показана на рис. 2.

Требуется найти искажения контрольной кромки детали в направлении оси X и сравнить результаты моделирования с данными измерений.

Для предотвращения дефектов печати между «пролётами» балки в фактическую геометрию образца, отправленную на 3D-принтер, добавлены поддержки, влиянием которых на прогибы контрольной оси можно пренебречь. Здесь и далее между образцом и платформой построения задавался неразрывный контакт.

Моделирование включало в себя этапы выращивания и охлаждения. Карта отклонений геометрии образца от номинальной, построенная на основе данных 3D-сканирования, показана на рис. 3.

Сравнение перемещений контрольной оси в расчёте и эксперименте показано на рис. 4.

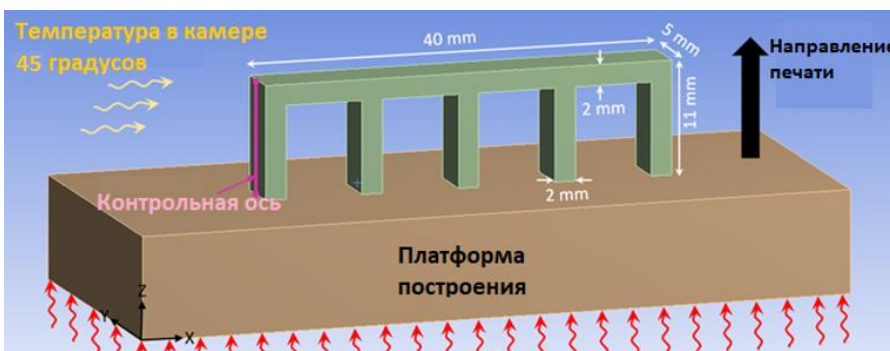


Рис. 2. Пятиопорная балка.

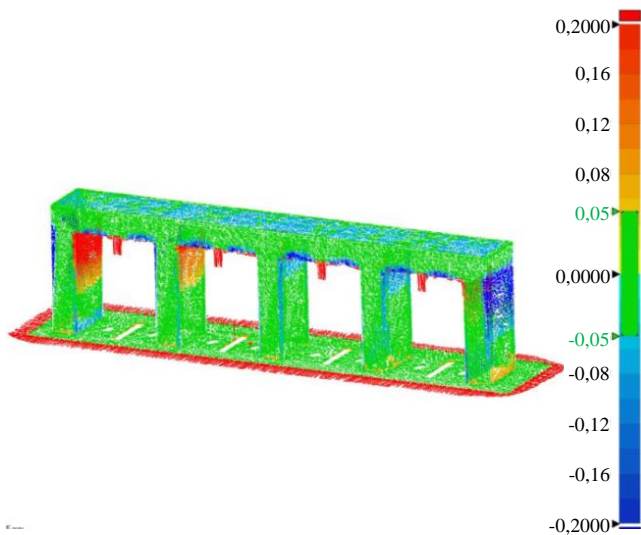


Рис. 3. Карта отклонений геометрии образца от номинальной, мм.

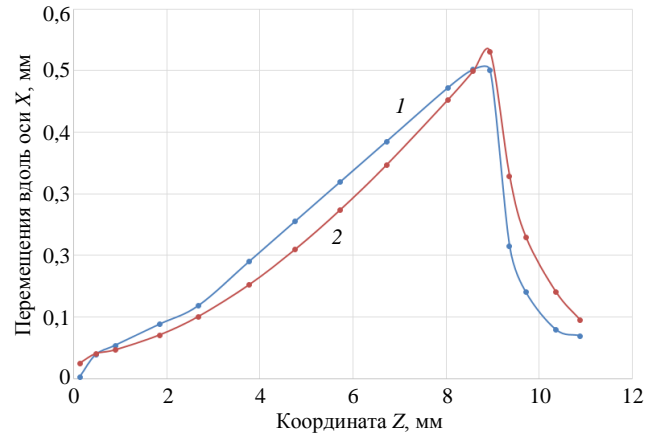


Рис. 4. Экспериментальные (1) и расчётные (2) значения отклонений геометрии от номинала.

### Консольная балка

Геометрия образца показана на рис. 5.

Требуется найти искажения контрольной кромки детали в направлении оси Z после удаления поддержек и сравнить результаты моделирования с данными измерений.

Моделирование включало в себя этапы выращивания и охлаждения, а также этап отделения образца от платформы. Карта отклонений геометрии образца от номинальной, построенная на основе данных 3D-сканирования, показана на рис. 6.

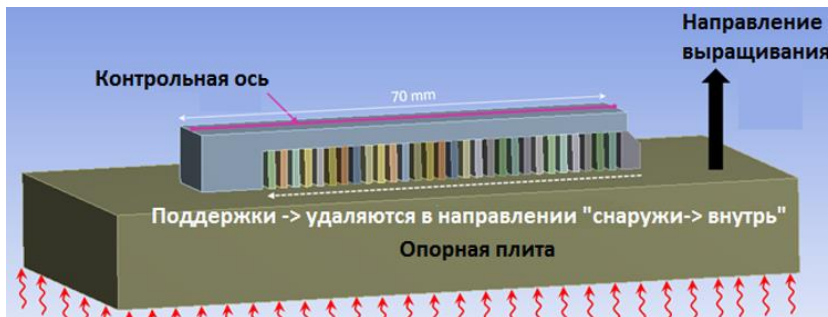


Рис. 5. Консольная балка.

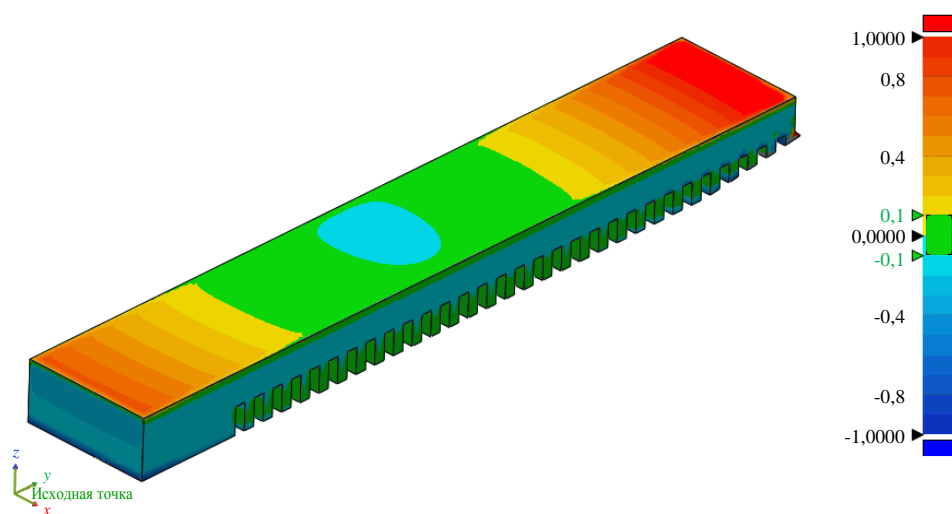


Рис. 6. Карта отклонений геометрии образца от номинальной, мм.

Сравнение перемещений контрольной оси в расчёте и эксперименте показано на рис. 7.

*Биконсольная балка*

Геометрия образца показана на рис. 8.

Требуется найти искажения контрольной кромки детали в направлении оси Z после удаления поддержек и сравнить результаты моделирования с данными измерений.

Моделирование включало в себя этапы выращивания и охлаждения, а также этап отделения образца от платформы. Карта отклонений геометрии образца от номинальной, построенная на основе данных 3D-сканирования, показана на рис. 9.

Сравнение перемещений контрольной оси в расчёте и эксперименте показано на рис. 10.

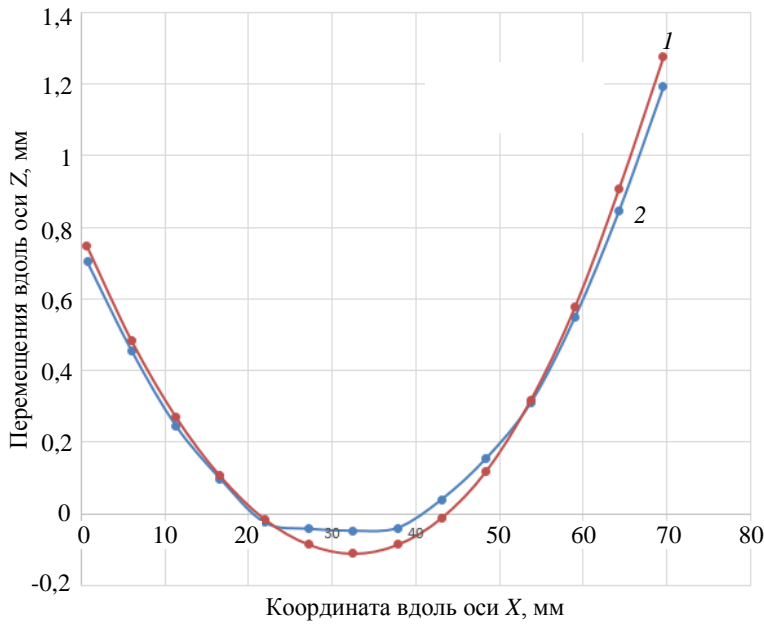


Рис. 7. Экспериментальные (1) и расчётные (2) значения отклонений геометрии от номинала.

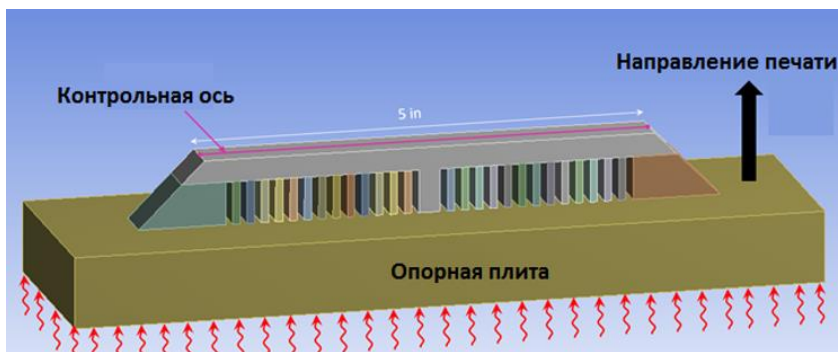


Рис. 8. Биконсольная балка.

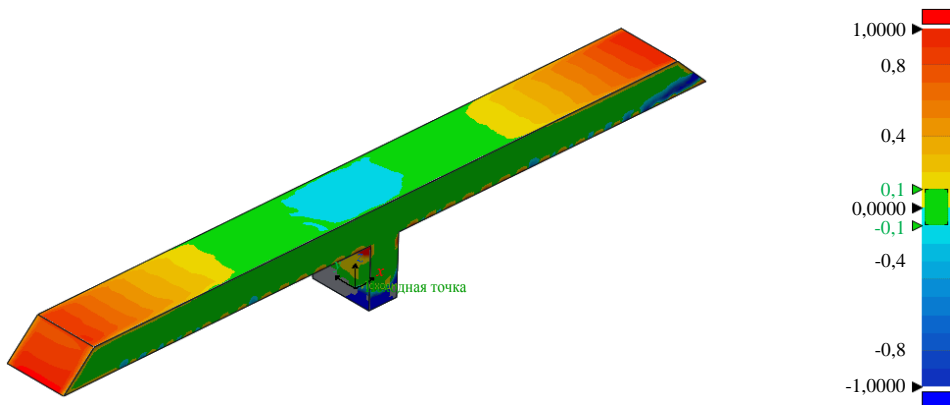


Рис. 9. Карта отклонений геометрии образца от номинальной, мм.

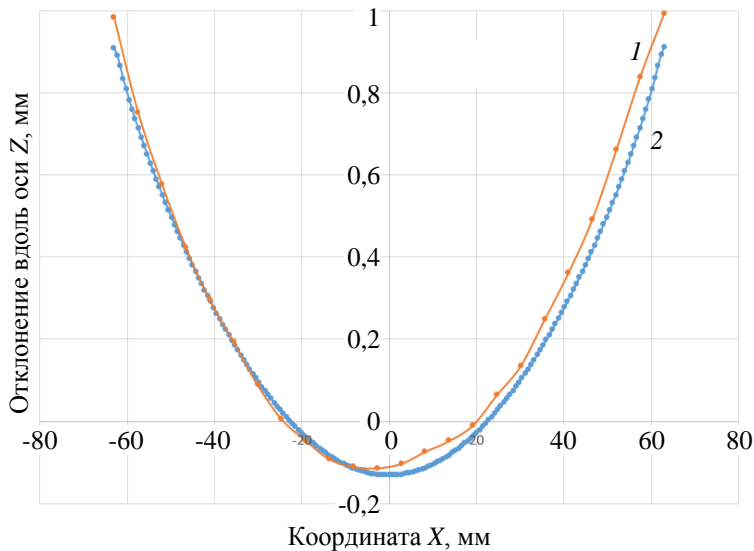


Рис. 10. Экспериментальные (1) и расчётные (2) значения отклонений геометрии от номинала.

### Заключение

Технология, отработанная в результате исследований изделий из жаропрочного никелевого сплава, обладает практической значимостью и ценностью для ракетно-космической техники, так как позволяет повысить точность изготовления деталей.

В результате исследования установлено, что подход ANSYS Additive к расчёту деформированного состояния изделий, изготовленных по технологии SLM, обеспечивает достаточную для практических приложений точность. Количественное соответствие данных конечно-элементного анализа и эксперимента позволяет использовать компьютерные модели, построенные в ANSYS Additive, не только для прогнозирования искажения формы деталей, но и для модификации их исходных геометрических моделей с целью компенсации коробления деталей после печати.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Добыши В. М. Аддитивные технологии в машиностроении. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015.
2. Шкуро А. Е., Кривоногов П. С. Технологии и материалы 3D-печати. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017.
3. Louvis E., Fox P., Sutcliffe C. J. // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211. P. 275.
4. Yasa E., Deckers J., Kruth J. P. // Rapid Prototyping Journal. 2011. Vol. 17. No. 5. P. 312.
5. Грязнов М. Ю., Шопин С. В., Чувильдеев В. Н. // Физика твердого тела: вестник Нижегородского университета Н.И. Лобачевского. 2014. № 4 (1). С. 46–51.
6. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. – Либликом, 2009.
7. Zienkiewicz O. C., Parekh C. J. // International Journal of Numerical Methods in Engineering. 1970. Vol. 2. P. 61.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. – Elsevier, 2014.
9. Tripathy S., Chin C., London T., Ankalkhope U., Oancea V. / Conference: NAFEMS World Congress 2017 (Stockholm, 2017). pp. 1–16.
10. Киришина А. А., Багерман А. З., Киришин А. Ю., Князьков М. Л., Левихин А. А. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Т. 2. № 384. С. 81–86.

## Numerical-experimental investigation of the deformed state of parts after their manufacture by selective laser sintering from a heat-resistant nickel-based alloy

A. B. Mazalov<sup>1</sup>, D. P. Shmatov<sup>2</sup>, A. S. Pustovalov<sup>1</sup>, E. A. Kishov<sup>3</sup>, and I. I. Morozov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Center for Additive Technologies, JSC  
285/5 Soldatskoe Pole st., Voronezh, 394056, Russia  
E-mail: aleksey.pustovalov@vselmash.ru

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University  
14 Moskovsky Prospect, Voronezh, 394026, Russia

<sup>3</sup> CADFEM CIS, JSC (Branch in the Volga Federal District)  
17 Moscow highway, Samara, 443013, Russia

Received November 26, 2019

*In the work, a qualitative and quantitative comparison of the shape deviation of samples made by the SLM (Selective Laser Melting) method, measured using 3D scanning and calculated on the basis of finite element modeling in the ANSYS Additive system, was carried out. The investigation was conducted on the example of three samples of heat-resistant nickel-based alloy 08XH53BMTYU – the Russian analogue of Inconel 718. Assessment of displacements was carried out both on the construction platform after cultivation, and after separation from it. A comparison of the experimental and calculated data for the displacements of the control points of the samples showed the accuracy of the calculation model based on computer modeling technologies ANSYS Additive, which is sufficient for practical purposes.*

**Keywords:** selective laser sintering, heat resistant nickel alloy, 3D printing simulation, finite element method, dynamic thermomechanical calculation, 3D scanning, ANSYS Additive.

### REFERENCES

1. M. A. Zlenko, M. V. Nagaytsev, and V. M. Dovysh, *Additive technology in mechanical engineering* (NAMI, Moscow, 2015) [in Russian].
2. A. E. Shkuro and P. S. Krivonogov, *3D printing technologies and materials* (Yekaterinburg, 2017) [in Russian].
3. E. Louvis, P. Fox, and C. J. Sutcliffe, *Journal of Materials Processing Technology* **211**, 275 (2011).
4. E. Yasa, J. Deckers, and J. P. Kruth, *Rapid Prototyping Journal* **17** (5), 312 (2011).
5. M. Gryaznov, S. Shopin, and V. Chuvildeev, *Physics of solid body: Bulletin of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod* **4** (1), 46 (2014).
6. A. B. Kaplun, E. M. Morozov, and M. A. Olfer'eva, *ANSYS in the hands of an engineer* (Librocom, 2009) [in Russian].
7. O. C. Zienkiewicz and C. J. Parekh, *International Journal of Numerical Methods in Engineering* **2**, 61 (1970).
8. O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and D. Fox, *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics* (Elsevier, 2014).
9. S. Tripathy, C. Chin, T. London, U. Ankalkhope, and V. Oancea, in *Proc. Conference: NAFEMS World Congress 2017* (Stockholm, 2017), pp. 1–16.
10. A. Kirshina, A. Bagerman, A. Kirshin, and M. Knyazkov, *Trudy Krylovskogo Nauchnogo Tsentra* **2** (384), 81 (2018).