



# Применение методики компенсации остаточных деформаций при прямом лазерном выращивании крупногабаритных изделий

А. Ю. Ковчик, А. М. Вильданов, Н. Р. Алымов, С. Ю. Иванов  
Институт лазерных и сварочных технологий Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (ИЛИСТ СПбГМТУ), Санкт-Петербург, Россия

Прямое лазерное выращивание находит широкое применение в наукоемких отраслях промышленности благодаря возможности создания сложнопрофильных изделий, изготовление которых невозможно традиционными методами производства. Однако производственный процесс осложнен формированием остаточных напряжений и деформаций в изделии негативно влияющих на его качество. Поле распределения напряжений и деформаций в изделии связано с его геометрией. В данной статье представлены основные способы решения данной проблемы, описаны типовые для ПЛВ виды деформаций и методы их компенсации. Представлены результаты компенсации деформаций на примере четырех изделий различной формы, из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и жаропрочного сплава ВЖ159.

**Ключевые слова:** Аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, остаточные напряжения и деформации, газотурбинная установка, компенсация деформаций

Статья получена: 18.06.2024

Статья принята: 11.07.2024

# Application of Residual Deformation Compensation Methods in Direct Laser Deposition of Large-Sized Products

A. Yu. Kovchik, A. M. Vildanov, N. R. Alymov, S. Yu. Ivanov,  
R. V. Mendagaliyev  
Saint Petersburg State Marine Technical University Institute of  
Laser and Welding Technologies (SMTU ILWT), St. Petersburg,  
Russia

Direct laser deposition is widely used in high-tech industries due to the possibility of creating complex parts, which manufacturing is impossible using traditional production methods. However, the production process is complicating by the formation of residual stresses and deformations in the part, which negatively affect its quality. The field of distribution of stresses and deformations in the part is associated with its geometry. This article presents the main compensation methods of part distortion and describes the types of typical part deformations for DLD. The deformation compensation results are presented on example of four different parts made of stainless steel grade 12Ch18Ni10Ti (analogue AISI 304) and heat-resistant alloy VZh159.

**Key words:** Additive technologies, Direct laser deposition (DLD), Residual stresses and deformations, Turbines, Deformations compensation.

Article received: 18.06.2024

Article accepted: 11.07.2024

## INTRODUCTION

Direct laser deposition is an additive technology method based on layer-by-layer deposition of metal powder onto a substrate using of highly concentrated laser radiation. Each deposited layer becomes the basis for the next one, thus the material using is aiming directly at forming the part. The technology allows utilize wide range of

## ВВЕДЕНИЕ

Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) – метод аддитивных технологий, основанный на послойной наплавке металлического порошка на подложку под воздействием высококонцентрированного лазерного излучения. Каждый наплавленный слой материала становится основанием для последующего, таким образом использование материала направлено исключительно на формирование изделия. Технология позволяет работать с широкой номенклатурой материалов, таких как титановые, алюминиевые, жаропрочные никелевые сплавы, а также нержавеющие стали [1]. Данный метод производства позволил изменить подход к проектированию изделий, стало возможным производство облегченных деталей, со сложной расчетной геометрией за более короткие сроки, в сравнении с традиционными методами производства. Благодаря этому прямое лазерное выращивание находит все большее применение в таких наукоемких отраслях промышленности как например: авиационное и ракетное двигателестроение, тепловая и атомная энергетика. [2].

Данные сферы промышленности требуют изготовления качественных изделий, соответствующих всем предъявляемым к ним требованиям, с минимальными издержками. Прямое лазерное выращивание любого изделия сопровождается образованием остаточных напряжений и пластических деформаций непосредственно в ходе выполнения наплавки. Производственный цикл ПЛВ представляет собой последовательность этапов (рис.1).

Пластические деформации формируются в изделии во время термического расширения материала вследствие локального воздействия высококонцентрированного лазерного излучения [3]. Остаточные напряжения образуются после пластических деформаций при кристаллизации и остывании материала. Они не исчезают с течением времени после завершения выращивания и снижают прочностные характеристики материала, поэтому изделие подвергается термообработке. Напряжения представляют собой внутренние усилия, неравномерно распределенные в изделии, они сопровождаются образованием упругих деформаций, и при их релаксации происходит изменение геометрии [4]. Устранить пластические деформации возможно путем изменения траектории наплавки так чтобы при деформации изделие приняло желаемую форму. Сложность заключается в том, что для получения достоверных данных о деформациях изделия необходимо произвести его пробное выращивание. Кроме того, после изменения траектории

materials, such as titanium, aluminum, heat-resistant nickel alloys, and stainless steels [1].

This production method has changed the approach to product design, it is able to produce parts with strict design geometry in a shorter time in opposite of traditional production technologies. Thereby, direct laser deposition is increasingly using in such knowledge-intensive industries as, for example: aircraft and rocket engine industries, thermal and nuclear power engineering [2].

These industries require the production of high-quality products corresponding all the requirements, with minimal costs. Direct laser deposition of any product is accompanying by the formation of residual stresses and plastic deformations directly during the deposition process. Thus, the DLD production cycle is a sequence of stages shown in Fig. 1.

Plastic deformations forms in the part during thermal expansion of the material in consequence of local influence of highly concentrated laser radiation [3].

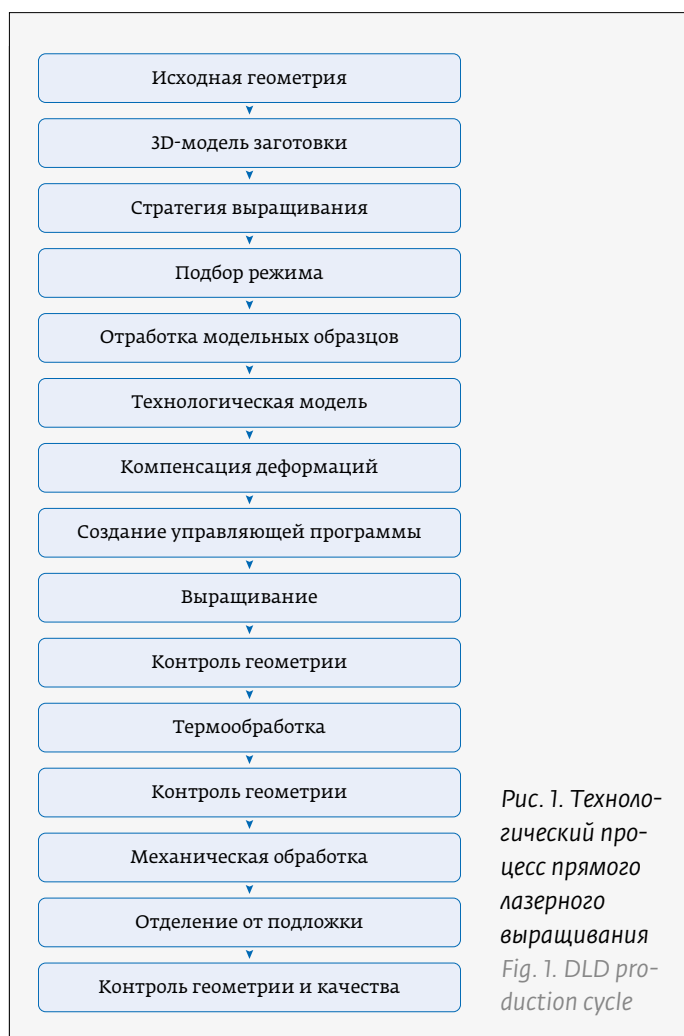


Рис. 1. Технологический процесс прямого лазерного выращивания  
Fig. 1. DLD production cycle



наплавки распределение деформаций также может измениться, что делает процесс итерационным.

Траектория выращивания определяется геометрией изделия, что делает поле распределения остаточных напряжений и деформаций уникальным. И тем не менее несколько изделий схожей формы и размеров могут иметь схожий характер деформаций, а значит решение по компенсации деформаций также может быть общим. Установив связь между геометрией изделия и характером его деформаций, получится снизить число итераций процесса ПЛВ и повысить его эффективность.

### ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ И МЕТОДЫ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

Перед описанием методов компенсаций деформаций, следует сформировать представление о характерных видах деформации. С точки зрения теории сварочных деформаций и напряжений [5], деформации делятся на две группы: «общие», которые вызывают искажения формы и размеров всего элемента, и «местные», которые распространяются на отдельные элементы конструкции. В контексте ПЛВ к общим деформациям можно отнести явление термической усадки изделия. При остывании происходит изменение объема наплавленного материала пропорционально изменению температуры, в результате линейные размеры изделия уменьшаются. Среди местных деформаций можно выделить несколько видов: седлообразные, распределенные деформации, коробление.

Величина термической усадки изделия определяется характеристиками материала. Компенсация данного явления осуществляется масштабированием геометрии на так называемый коэффициент усадки, который определяется отношением линейных размеров выращенного изделия относительно размеров целевого изделия. Методика определения коэффициента усадки представлена в источнике [6]. Компенсация усадки производится для изделий любой формы и размеров без исключения. Однако в случае с изделиями, представляющими собой тела вращения: кольца, цилиндры и т.д. масштабирование геометрии, зачастую, является единственной необходимой мерой для компенсации деформаций.

Металлическая подложка – это основа с которой начинает свой рост каждое изделие, следует отметить некоторые характерные особенности. Способ закрепления подложки может иметь критическое значение в зависимости от свойств материала и геометрии изделия. Рассмотрим два варианта закрепления: первый – подложка жестко зафиксиро-

Residual stresses are forming after plastic deformations during crystallization and cooling of the material. They reduce the strength characteristics of the material and staying after completion of deposition, therefore the part is subjecting to heat treatment. Residual stresses are the main forces unevenly distributed in the part, they are accompanying by the elastic deformations, and when they relax, a part geometry is change [4]. Plastic deformation can be eliminating by changing the trajectory of the deposition so as to the product takes the desired shape during deformation. The difficulty is that to obtain reliable data of the part deformations, it is necessary to make a tested part deposition. In addition, after changing the depositing trajectory, the distribution of deformations may also change, which makes the process iterative.

The deposition trajectory is determining by the part geometry, so the distribution of residual stresses and deformations becomes unique. However, several parts, which have similar shape and size, may have similar deformation patterns, which means that the solution for deformations compensating may also be common. Have determined a connection between the part geometry and the deformations patterns, it will be possible to solve the problem of iterations numbers in DLD process and increase its efficiency.

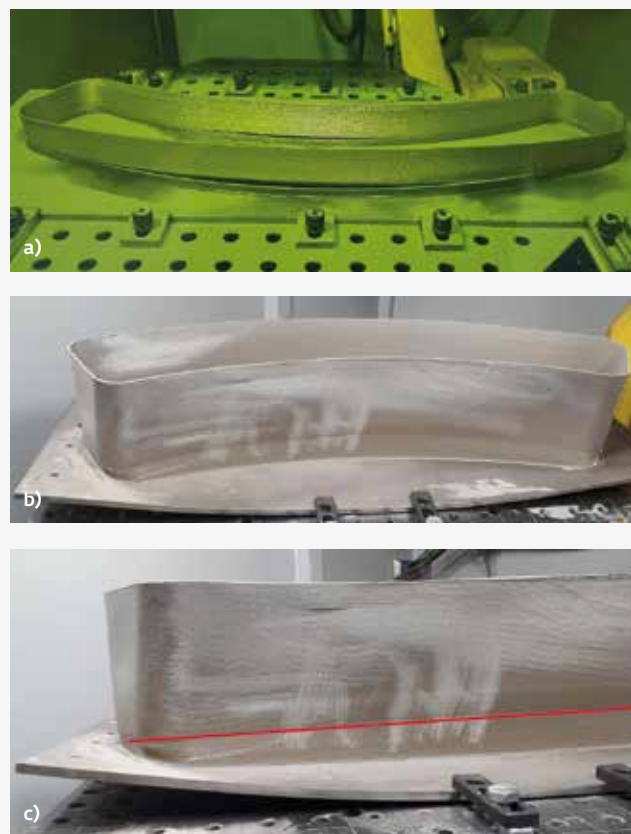
### DEFORMATIONS TYPES AND THEIR COMPENSATION METHODS.

Before describing the deformations compensation methods, it is necessary to classify the deformations types. In point of the welding deformations and stresses theory [5], deformations are dividing on two groups: “General”, which cause distortions of the shape and size of the entire element; and “local”, which spread to individual elements of the part design. Such effects like thermal shrinkage can be attributing to general deformations. Meaning of thermal shrinkage is the volume changing of the deposited material during its cooling is proportional to the temperature changing, as a result the linear dimensions of the part decrease. Local deformations includes several types: saddle-shaped, distributed deformations, warping.

The degree of part thermal shrinkage is determining by material characteristics. Compensation for this effect achieved by scaling on shrinkage coefficient, which can be determinate by the ratio of the linear dimensions depositing part to the dimensions of etalon part. The determining method of the shrinkage coefficient presented in the source [6]. Shrinkage compensation uses to every part. However, for axis-symmetrical part for example: rings, cylinders, etc., the scaling is only necessary compensation method.

рована на столе (рис. 2а), положение ограничено со всех сторон, второй – подложка закреплена в центре (рис. 2б), края подложки освобождены. Первый способ используется, если подложка является частью геометрии изделия, или изделие массивное, т.е. площадь наплавки слоя велика. Жесткое закрепление сопровождается высокой концентрацией напряжений в материале изделия, поэтому применяется при выращивании из пластичных материалов с высоким показателем относительного удлинения, однако необходимо также учитывать особенности геометрии изделия. Для малопластичных материалов или изделий с низкой жесткостью конструкции, как, например, тонкостенные оболочки, это может стать причиной разрушения (рис. 2а). При втором способе закрепления остаточные напряжения частично компенсируются за счет образования седловидной деформации подложки. Незафиксированные края поднимаются в направлении роста, это позволяет сохранить целостность изделия. Однако, управляющая программа не учитывает изменение формы подложки, наплавка продолжается по заданной траектории. Свободные концы подложки поднимаются быстрее чем происходит наплавка, таким образом часть геометрии изделия теряется (рис. 2б). Поэтому при выращивании с использованием деформируемой подложки в геометрию изделия добавляется увеличенный компенсационный слой, нивелирующий влияние деформаций (рис. 2с). Компенсационный слой – сегмент, предшествующий выращиванию основного изделия, который добавляется в каждое изделие чтобы упростить процесс отрезки от подложки.

Распределенные деформации представляют собой крупные области с низким градиентом отклонений от требуемой геометрии изделия [7]. Данный вид деформаций наиболее часто встречается в изделиях, исключениями являются массивные конструкции с высокой жесткостью. Компенсация осуществляется предварительным изменением геометрии в направлении противоположном деформациям выращенного изделия (рис 3). При повторном выращивании изделия со скомпенсированной геометрией достигается желаемая форма. Чаще всего именно данный вид деформаций становится причиной дополнительных итераций процесса. Наиболее остро проблема проявляется при производстве крупногабаритных тонкостенных оболочек, для которых незначительные изменения геометрии приводят к существенным изменениям характера деформаций в виду низкой жесткости конструкций. Поэтому компенсация деформаций



**Рис. 2.** Сегмент тонкостенной оболочки толщиной 3 мм из сплава ВТ6: а) на жестко зафиксированной подложке; б) закрепленной по центру; в) с увеличенным компенсационным слоем

**Fig. 2.** A segment of a thin-walled shell 3 mm thick made of VT6 (analogue Ti6Al4VELi) alloy a) on a rigidly fixed substrate; b) fixed in the center; c) with an increased compensation layer

The substrate is the base where each part begins its deposition, so some characteristic features should be noted. Consider two options for fixing the substrate: the first is when the substrate is rigidly fixed to the table (Fig. 2a), the position is limited on all sides, the second one is when the substrate is fixed in the center (Fig. 2b), the edges of the substrate are free. The first method should be used if the substrate consider some elements of part geometry, or the depositing part is massive, i.e. the area of the layer deposition is large. Full fixation is accompanying a high stress concentration in the part material. Therefore this fixation method using for plastic metals deposition with a high relative elongation index. However is also necessary to take into account the part geometry. For low-plasticity materials or products with low con-



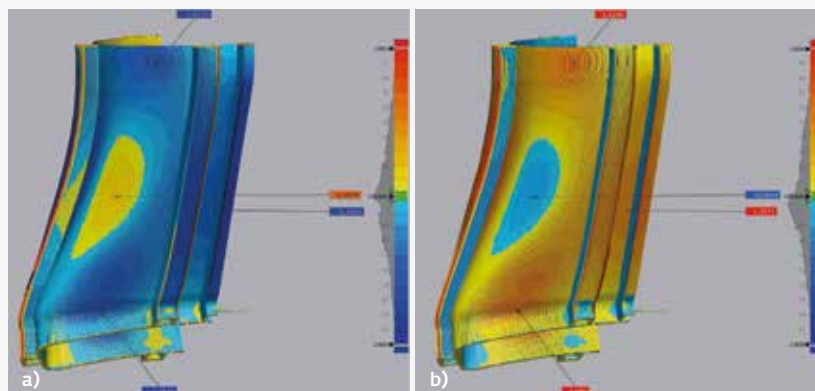
для данных изделий дополняется компьютерным моделированием напряженно-деформированного состояния.

Коробление или потеря устойчивости представляют собой волнообразные деформации стенки изделия с высоким градиентом отклонений от целевой геометрии. Образуется данный дефект в результате недостаточной жесткости изделия, встречается только при выращивании тонкостенных оболочек [8].

Метод компенсации, применимый для распределенных деформаций, в данном случае не эффективен. Решение данной проблемы заключается в повышении жесткости оболочки. Достигнуть этого можно несколькими способами: увеличением толщины стенки оболочки или добавлением элементов жесткости (стрингеров) на поверхности изделия. Стрингеры позволяют преобразовать коробление в распределенную деформацию, которая, как было описано ранее, компенсируется предварительным изменением геометрии изделия. Стрингеры являются технологическими элементами, по завершению изготовления их удаляют с поверхности изделия.

Применение компенсационных мер позволяет решить проблему деформаций, однако не приводит к их релаксации остаточных напряжений, поэтому после завершения технологического процесса изделие необходимо подвергнуть термической обработке.

В качестве примера применения методов компенсации деформаций являются изделия, входящие в состав газосборника камеры сгорания газотурбинной установки ГТЭ-65.1. Полный производственный процесс комплекта изделий представлен в источнике [9]. Газосборник включает в себя 4 детали с различными типами геометрии, а также двух разнородных материалов (рис. 4). Внутренняя оболочка газосборника, рамка и кольцо изготовлены из жаропрочного сплава на основе никеля ВЖ159, внешняя оболочка газосборника – из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Внутренняя и внешняя оболочки (1, 4) представляют собой тонкостенные крупногабаритные изделия и предположительно являются легкодеформируемыми за счет невысокой жесткости конструкции. Предсказать характер и степень деформации которых



**Рис. 3.** Сравнение рассчитанной модели с моделью изделия: а) до обратной деформации, б) после обратной деформации

**Fig. 3.** Comparison of the calculated model with the product model: a) before geometry changing; b) after geometry changing

struction rigidity, such as thin-walled shells, this can cause destruction (Fig. 2a). Using by the second fixing method, the formation of a saddle-shaped deformation of the substrate compensate residual stresses partially. Unfixed edges rise in the direction of deposition, which allows maintaining part integrity. However, the main program does not take into account the substrate changing, the surfacing continues along the specified trajectory. The free ends of the substrate rise faster than the dispositioning occurs, so a fragment of part geometry is lost (Fig. 2b). Therefore, it use increased compensation layer in deformable substrate case, leveling out the influence of substrate deformations (Fig. 2c).

Compensation layer – a segment preceding the growth of the main product, which adds in each part to simplify the process of cutting from the substrate.

Distributed deformations are large areas with a low gradient of deviations from the required geometry of the product [7]. This type of deformation encounters in parts, with the exception of massive design with high rigidity. Compensation carry out by preliminary changing the part geometry in the direction opposite to the part deformations (Fig. 3). When deposition process repeats the part takes desire shape. This type of deformation becomes the cause of additional iterations. The problem is especially relevant in the production of large-sized thin-walled shells. For these parts minor changes in geometry lead to significant changes in the deformations patterns due to the low construction rigidity Therefore, compensation of



затруднительно без применения расчетных методов моделирования процесса ПЛВ или пробного выращивания. Рамка (2) представляет собой толсто-стенное изделие с зеркальной симметрией, которое предположительно не претерпит масштабных деформаций. Кольцо (3) – жесткое изделие, состоящее из двух осесимметричных оболочек, соединенных ферменными элементами, в дополнение имеет усиления на внешней стенке, изменение геометрии кольца предполагаются главным образом вследствие термической усадки.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Изготовление заготовок элементов газосборника проводилось на установке прямого лазерного выращивания «ИЛИСТ-L» производства СПбГМУ (рис. 5). Технические характеристики установки «ИЛИСТ-L» приведены в таблице. Траектории и управляющие программы для роботизированной лазерной обработки заготовок элементов газосборника создавались в программном пакете Autodesk PowerMill. Контроль геометрии заготовок производился с помощью измерительной пары, состоящей из оптического 3D сканера и трека Metroscan Elite 750. Обратная деформация моделей изделий производилась с использованием пакета прикладных программ для технических вычислений Matlab по данным поля отклонений геометрии, полученным в программе Geomagic ControlX.



Рис. 5. Установка прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-L  
Fig.5. Direct laser deposition complex ILIST-L

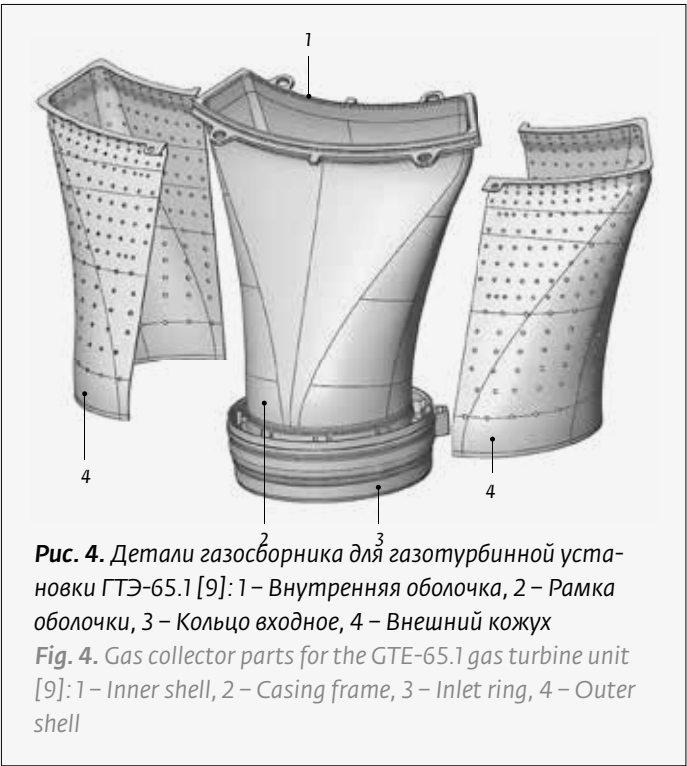


Рис. 4. Детали газосборника для газотурбинной установки ГТЭ-65.1 [9]: 1 – Внутренняя оболочка, 2 – Рамка оболочки, 3 – Кольцо входное, 4 – Внешний кожух  
Fig. 4. Gas collector parts for the GTE-65.1 gas turbine unit [9]: 1 – Inner shell, 2 – Casing frame, 3 – Inlet ring, 4 – Outer shell

Таблица. Технические характеристики установки «ИЛИСТ-L»

Table. The technical characteristics of the complex ILIST-L

Параметр Parameter	Значение Value
Мощность лазерного излучения (макс.) Laser power (max)	3 кВт 3 kW
Длина волны излучения Laser wavelength	1070,4 нм 1070.4 nm
Размер рабочей зоны Working area size	ø1 300×800 мм ø1 300×800 mm
Количество синхронно-управляемых осей Number of controlled axes	8 шт. 8 cl.
Грузоподъемность наклонно-поворотного позиционера Positioner payload	500 кг 500 kg
Порошковый питатель Powder feeder	Колба, 5 л – 2 шт. Bunker, 5 l – 2 cl.
Фракция МПК fractional composition	20–200 мкм 20–200 mkm
Рабочая атмосфера Inert atmosphere	Аргон ВЧ Argon
Производительность подачи порошка Powder feed capacity	2 кг/ч 2 kg/h

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА

Первым подготовительным этапом является преобразование моделей изделий в модели заготовок. В модели изделий были добавлены компенсационные слои, применены масштабные коэффициенты, в рамку и кольцо добавлены припуски под механическую обработку. На поверхность внешнего кожуха были добавлены стрингеры с толщиной стенки 2 мм с целью повышения жесткости изделия, при этом геометрия кожуха на начальном этапе не изменялась.

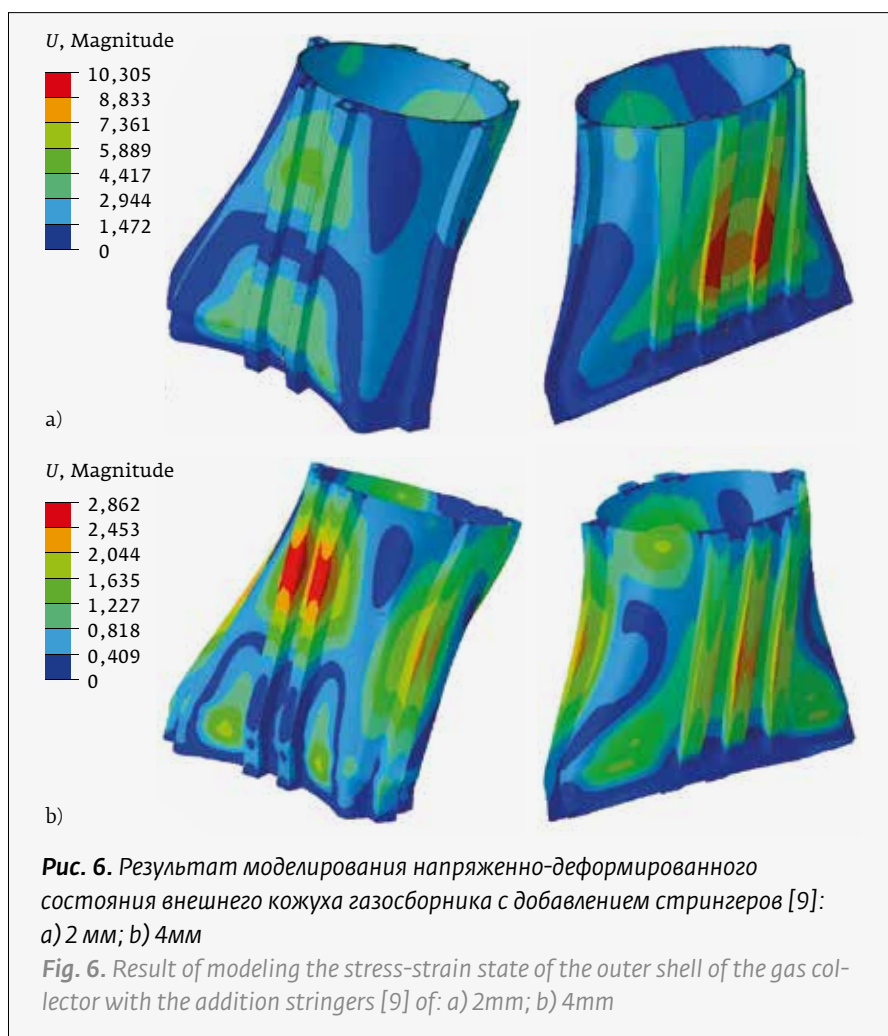
Для компенсации деформаций внешнего кожуха и внутренней оболочки газосборника потребовалось произвести моделирование напряженно-деформированного состояния производилось методом конечных элементов. Процесс моделирования состоял из решения задачи теплопроводности и упругопластической задачи, при этом учитывались температурные зависимости теплофизических и механических свойств, режим выращивания и последовательность наплавки слоев. Для экономии расчетного времени моделирование наплавки слоя производилось не последовательным добавлением материала с перемещением источника теплоты, а путем добавления слоя материала целиком. Как показывает практика, результаты данного решения хорошо совпадают с результатами расчета перемещения источника теплоты, при этом существенно сокращается количество расчетных шагов [10]. На рис. 6 и 7 показаны результаты моделирования напряженно-деформированного состояния изделий. Величина максимального итогового отклонения геометрии внешнего кожуха превышает 10 мм с учетом использования стрингеров (рис. 6а). Результат показал отклонение в несколько раз превышающее толщину стенки изделия, отсюда следует, что изделие не обладает достаточной жесткостью для применения обратной деформации. Обеспечения необходимой жесткости изделия удалось достигнуть за счет увеличения толщины стенки стрингеров до 4мм, также стрингеры были

деформации для этих продуктов сопровождаются компьютерным моделированием состояния напряженно-деформированного состояния.

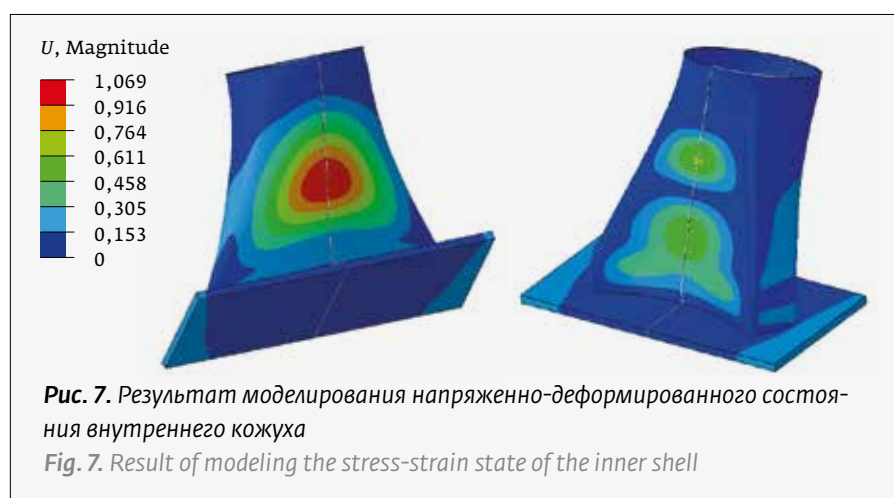
Варп или потеря устойчивости являются волнообразными деформациями стенок детали с высоким градиентом отклонения от желаемой геометрии. Этот дефект возникает в результате недостаточной жесткости конструкции детали, что является типичным для тонкостенных оболочек [8].

Метод компенсации, применимый к распределенным деформациям, не эффективен в этом случае. Решение этой проблемы заключается в увеличении жесткости оболочки. Это достигается несколькими способами: за счет увеличения толщины стенки оболочки или за счет добавления stiffening elements (stringers) на поверхность детали. Stringers трансформируются в распределенную деформацию, что описано ранее. Stringers являются технологическими элементами, после производства они удаляются с поверхности детали.

Использование методов компенсации позволяет решать проблему деформаций, однако, оно не приводит к релаксации остаточных напряжений, поэтому, после







completion of the technological process, and a part subjected to heat treatment.

An application of deformation compensation methods shown on example of parts included in the gas collector of the combustion chamber GTE-65.1 gas turbine unit. The complete production process of the set of products is presenting in the source [9]. The gas collector includes four elements with different types of geometry, which made of different materials (Fig. 4). The inner shell of the gas collector, the frame, and the ring are made of heat-resistant nickel-based alloy

сгруппированы в области наибольших деформаций. В текущей конфигурации моделирование процесса показало (рис. 6b) отклонения, не превышающие 2,8 мм от поверхности стрингера и не более 2 мм от поверхности изделия, что является удовлетворительным результатом.

Добавление стрингеров на внутренний кожух не потребовалось, поскольку его собственной жесткости оказалась достаточно за счет большей толщины стенки, чтобы избежать образования коробления. Согласно результатам моделирования, максимальные отклонения геометрии внутреннего кожуха с учетом компенсации распределенных деформаций не превышает 1 мм (рис. 7). На основании полученных данных геометрия моделей заготовок внешней оболочки и внутреннего кожуха была изменена, после чего были созданы управляющие программы выращивания.

Чтобы снять остаточные напряжения изделий были отработаны режимы термической обработки для стали 12Х18Н10Т и ВЖ159. Термическая обработка внешнего кожуха требовала особого внимания. Обработка производилась, без отделения от металлической подложки, в противном случае произошло бы перераспределение напряжений, что привело бы к непредсказуемым деформациям изделия. Чтобы сохранить форму кольцевой части кожуха неизменной после термообработки был изготовлен специальный стапель также из стали марки 12Х18Н10Т (рис.8а). Стапель был установлен в изделие, как показано на (рис.8б).

## ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

После завершения предварительной подготовки моделей и технической подготовки было проведено прямое лазерное выращивание изделий

VZh159, the outer shell of the gas collector is made of stainless steel grade 12Ch18Ni10Ti (analogue AISI 304L). The inner and outer shells (1, 4) are thin-walled large-sized parts and deformed easily due to the low rigidity of the construction. It is difficult to predict the pattern and degree of deformation without using of computational methods for modeling the DLD process or trial production. The frame (2) is a thick-walled product with mirror symmetry, which unexpected large-scale deformations. The ring (3) is a rigid part consisting of two axisymmetric shells connected by truss elements, in addition, it has reinforcements on the outer wall, and the change in the geometry of the ring is expecting mainly due to thermal shrinkage.

## EQUIPMENT AND MATERIALS

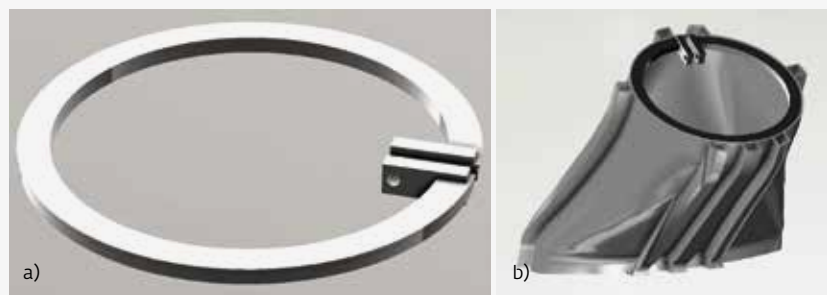
The production of gas collector elements carried out using the ILIST-L direct laser deposition complex manufactured by SMTU (Fig. 5).

The technical characteristics of the complex ILIST-L presents in Table 2. The trajectories and control programs for robotic laser processing of gas collector element created in the Autodesk PowerMill software package. The geometry of the workpieces controlled using a measuring pair included an optical 3D scanner Metroscan Elite 750 and c-track Black Elite. The reverse deformation of the part 3D-models carried out using the Matlab application package for technical calculations based on the geometry deviation field data obtained in the Geomagic Control X program.

## TECHNICAL PREPARING

The first preparatory stage is the transformation of product models into blank models. Compensation layers added to the part models, scale coefficients applied, allowances for mechanical processing added





**Рис. 8.** Стاپель для термообработки внешней оболочки кожуха (а) и его положение в изделии (b)

**Fig. 8.** Frame for heat treatment of the outer shell (a) and its position in the part (b)

в установке прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-Л.

Рамка – единственное изделие из представленных, характер деформаций которого был определен экспериментально. Подготовка и моделирование процесса ПЛВ рамки потенциально потребовало существенно больше времени, чем сам процесс выращивания. Согласно данным контроля геометрии была произведена обратная деформация модели изделия, составлена новая управляющая программа, после чего было выполнено повторное выращивание изделия.

Контроль геометрии внешней и внутренней оболочки показал отклонения недопустимые в указанных требованиях. Их модели заготовок были скорректированы, применением обратной деформации, после чего были составлены новые управляющие программы и произведено повторное выращивание.

Далее каждое из изделий было подвергнуто термообработке в соответствии с отработанными режимами. После ТО изделия были отделены от подложек и произведен контроль геометрии каждого из изделий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 9 и 10 показаны результаты контроля геометрии после проведения ТО рамки и кольца соответственно, пределы шкалы отклонений  $\pm 2$  мм. Оба изделия продемонстрировали в целом удовлетворительный результат. Максимальные отклонения рамки достигают 1,8 мм, однако они локализованы в зонах припуска под механическую обработку, отклонения ключевых размеров не превышают 1 мм. Отклонения геометрии кольца не

to the frame and ring. Stringers with a wall thickness of 2 mm added on surface of outer shell in order to increase the part rigidity, while the geometry of the shell did not change at the first stage.

To deformations compensation of the outer shell and the inner shell of the gas collector, it was necessary to simulate the stress-strain state using the finite element method. The modeling process consisted of solving thermal conductivity problem and the elastic-plastic problem, taking into account the temperature dependences of the thermal and

mechanical properties, the growth mode and the sequence of layer deposition. To save the estimated time, the material added in every layer at once. As practice shows, the results of this solution coincide well with the results of calculating the movement of the heat source, while the number of calculation steps is significantly reduced [10]. On Fig. 6 and Fig. 7 shown results of modeling the stress-strain state of part. The maximum deviation of the outer shell geometry exceeds 10 mm, taking into account the use of stringers (Fig. 6a). The result showed a deviation several times greater than the wall thickness of the product, hence it follows that the product does not have sufficient rigidity for the application of reverse deformation. The necessary rigidity of the part achieved by increasing the wall thickness of the stringers to 4 mm, and the stringers also grouped in the area of the greatest deformations. In the current configuration, the process modeling showed (Fig. 6b) deviations not exceeding 2.8 mm from stringer surface, and not more than 2 mm from the product surface, which is a satisfactory result.

Adding stringers to the inner shell was not required since its own rigidity was sufficient to avoid warping due to the greater wall thickness. According to the simulation results, the maximum deviations in the geometry of the inner casing, taking into account the compensation of distributed deformations, do not exceed 1 mm (Fig. 7). Based on the obtained data, the geometry of the outer shell and inner shell 3d-models changed, after which control programs for deposition created.

Heat treatment modes for 12Ch18Ni10Ti and VZh159 steel were developed. The heat treatment of the outer

превышают 0,6 мм, что также является удовлетворительным результатом.

Контроль геометрии внутреннего кожуха газосборника после завершения выращивания и термообработки представлен на рис. 11, пределы шкалы отклонений  $\pm 2$  мм. После отделения от подложки максимальные отклонения, не превышают 1,2 мм, в местах сборки с остальными деталями отклонения не превышают 0,5 мм.

После завершения выращивания внешний кожух газосборника был подвергнут термообработке, после чего с него были срезаны стрингеры и кожух был отделен от подложки. По завершению каждого технологического этапа, от окончания выращивания до отделения от подложки производился контроль геометрии изделия. Результаты контроля представлены на рис. 12, пределы шкалы отклонений  $\pm 5$  мм. В области установки стапеля для ТО отклонения не превышают 1,2 мм, что соответствует требованиям допуска в  $\pm 2$  мм, нежелательное отклонение в 2,8 мм наблюдается в основании изделия, в компенсационном слое, однако данный участок будет отделен от изделия. После удаления стрингеров и отделения от подложки геометрия изделия претерпела изменения в сравнении с результатами термообработки, это означает неполную релаксацию остаточных напряжений. Максимальные отклонения геометрии оболочки после отделения от подложки составили 3 мм, что является превышением требования допуска формы  $\pm 2$  мм.

Изменение геометрии при отделении от подложки и удалении стрингеров обусловлено неполным снятием напряжения при термообработке. Таким образом, режим ТО требует корректировки.

Следует отметить, что при моделировании напряженно-деформированного состояния учи-

сывая required special attention. The treatment made without separation from the metal substrate. Otherwise, a redistribution of stress would occur, which would lead to unpredictable deformations of the part. A special frame made from 12Ch18Ni10Ti stainless steel to keep the ring shape undeformed after heat treatment (Fig. 8a). The installation principle shown in the figure (Fig. 8b).

## EXPERIMENT

The next stage was direct laser deposition of part in the DLD complex ILIST-L.

The frame is the only product among those presented whose deformation nature was determined experimentally. Modeling of the frame DLD process potentially required significantly more time than the deposition process itself. The frame manufactured and scanned. According to the geometry control data, the product model was reversely deformed, and a new control program created, after the entire frame was re-deposited.

The remaining parts manufactured and subjected to geometry control. Then each of the products subjected to heat treatment in accordance with the developed modes. After the heat treatment, the part separated from the substrates and each of its were re-scanned.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

Figures 9 and 10 show the results of geometry control after heat treatment maintenance of the frame and ring, respectively, the deviation scale limits are  $\pm 2$  mm. Both products demonstrated a generally satisfactory result. Maximum deviations of the frame reach 1.8 mm, however, they are localized in the areas of

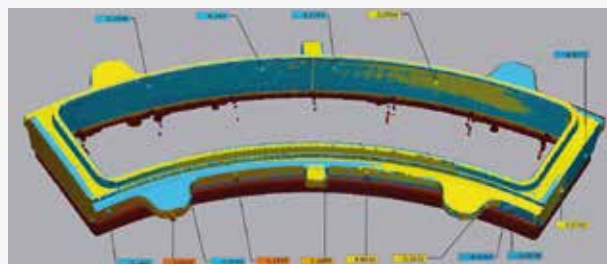


Рис. 9. Контроль геометрии компенсированной рамки  
Fig. 9. Result of control compensated frame geometry

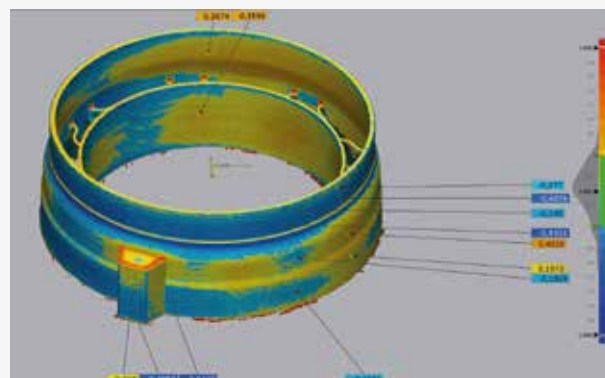
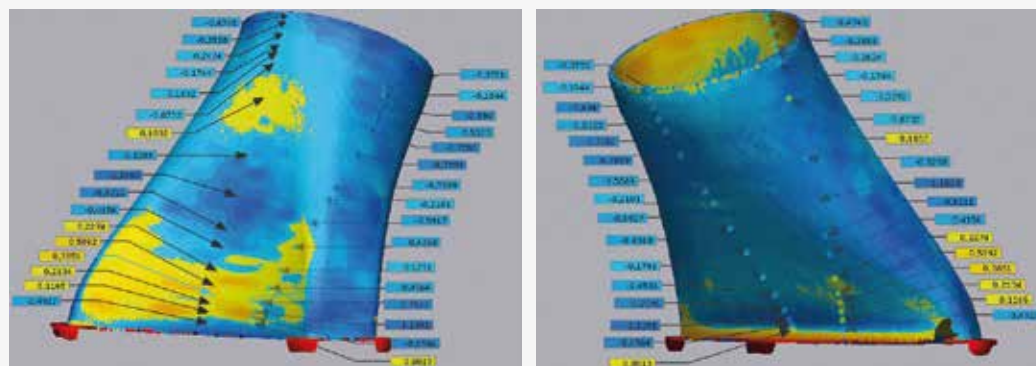


Рис. 10. Контроль геометрии кольца  
Fig. 10. Result of control compensated ring geometry



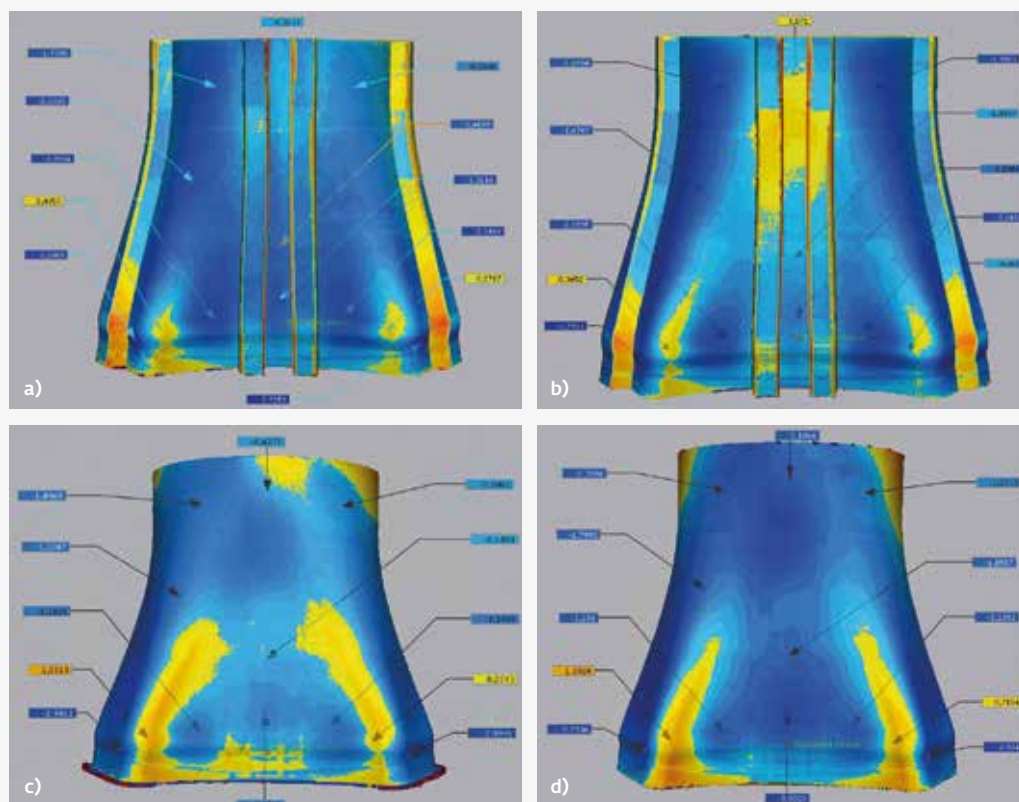
**Рис. 11.** Контроль геометрии внутреннего кожуха

*Fig. 11. Result of inner shell geometry control*

тывались деформации изделий только в процессе наплавки, поэтому значения отклонений итоговой геометрии изделий и расчетных данных имеют расхождения. Однако порядок отклонений расчетной геометрии относительно итоговой не превышает  $\pm 2$  мм, что говорит о жизнеспособности расчетной модели, и положительно характеризует применение компьютерного моделирования для прогнозирования и компенсации деформаций изделий при прямом лазерном выращивании.

allowance for mechanical processing, deviations of principal dimensions do not exceed 1 mm. Deviations of ring geometry do not exceed 0.6 mm, which is also a satisfactory result.

The geometry control of the gas collector inner shell after production and heat treatment shown in Fig. 11. The limits of the deviation scale are  $\pm 2$  mm. After separation from the substrate, the maximum deviations do not exceed 1.2 mm, in the places of assembly with other parts, the deviations do not exceed 0.5 mm.



**Рис. 12.** Контроль геометрии внешней оболочки кожуха:

а) после завершения выращивания; б) после термообработки; в) после удаления стрингеров; д) после отделения от подложки

*Fig.12. The geometry control of the outer shell: a) after production; b) after heat treatment; c) after removal of stringers; d) after separation from the substrate*





## ВЫВОДЫ

В зависимости от жесткости конструкции изделия меняется необходимый и достаточный объем предварительной подготовки и компенсационных мер. Кольцо, которое является примером изделия с высокой жесткостью конструкции требует только компенсации термической усадки. Внешний кожух – легкодеформируемая тонкостенная оболочка, требует комплексной подготовки с применением компьютерного моделирования.

Применение компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния изделия целесообразно для легкодеформируемых изделий, таких как тонкостенные оболочки, характер и степень деформации которых затруднительно предсказать. В комбинации с методами компенсации деформаций компьютерное моделирование позволяет снизить количество итераций процесса прямого лазерного легкодеформируемых изделий.

Технологический процесс обязательно должен предусматривать ТО изделия. Однако важно правильно подобрать параметры для ТО, в противном случае релаксация остаточных напряжений произойдет не в полном объеме, что послужит при-

After production, the gas collector outer shell subjected to heat treatment, next stringers cut off and the substrate removed. Upon completion of each technological stage, from the end DLD to substrate separation, the part scanned. The control results are presented in Figure 12, the deviation scale limits are  $\pm 5$  mm. In the segment of the heat treatment frame installation, the deviations do not exceed 1.2 mm, which meets the tolerance requirements of  $\pm 2$  mm, an undesirable deviation of 2.8 mm observed at the bottom of the part, but this area is in the compensation layer and separated from the product. After removing the stringers and separating from the substrate, the geometry of the shell has undergone changes in comparison with the control results after heat treatment, which means incomplete relaxation of residual stresses. The maximum deviations of the shell geometry after separation from the substrate were 3 mm, which exceeds the form tolerance requirement of  $\pm 2$  mm.

It should be noted that modeling the stress-strain state takes into account deformations of products only during the deposition process, therefore the values of deviations of the final product geometry and the calculated data is partially different. However, the deviations pattern of the calculated geometry relative to the

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
 САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
 ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
 ИЦМУ «ПЕРЕДОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»  
 ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ  
 ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»  
 ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ «РОСКОСМОС»  
 АССОЦИАЦИЯ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

22-25 СЕНТЯБРЯ 2024

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

## XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. CAD-CAM-CAE СИСТЕМЫ.
2. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ, НАПЛАВКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ.
3. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.
4. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ РЕЗКИ, ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ.
5. МЕТРОЛОГИЯ, СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ДЕФЕКТОСКОПИЯ.

Тел./Факс: +7 (812) 757-10-77 e-mail: [ilwt@ilwt.smtu.ru](mailto:ilwt@ilwt.smtu.ru), [e.pozdeeva@lrc.ru](mailto:e.pozdeeva@lrc.ru)  
 Web-site: [www.btl.smtu.ru](http://www.btl.smtu.ru)



чиной образования дополнительных деформаций после отделения изделия от подложки.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90206.

## REFERENCES

1. Liu S., Shin Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*. 2019; 164: 107552.
2. Blakey-Milner B., Gradi P., Snedden G., Brooks M. et al. *Metal additive manufacturing in aerospace: A review*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>.
3. Li C., Liu Z., Fang X., Guo Y. Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 2018; 71:348–353.
4. Bastola N.; Jahan M. P.; Rangasamy N.; Rakurty C. S. A Review of the Residual Stress Generation in Metal Additive Manufacturing: Analysis of Cause, Measurement, Effects, and Prevention. *Micromachines*. 2023; 14: 1480. <https://doi.org/10.3390/mi14071480>.
5. Gatovskij K. M., Karhin V. A. *Teoriya svarochnykh deformacij i napryazhenij*. Izd. LKI: 1981; 12–13.  
Гатовский К. М., Кархин В. А. *Теория сварочных деформаций и напряжений*. Изд. ЛКИ: 1981; 12–13.
6. Kovchik A., Babkin K., Vildanov A. Research of deformation compensation method in laser metal deposition process of 12X18H10T stainless steel product. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2077 012010
7. Babkin K. D., Zemlyakov E. V., Ivanov S. Yu. Distortion prediction and compensation in direct laser deposition of large axisymmetric Ti-6Al-4V part. *Procedia CIRP*. 2020; 94:357–361.
8. Vastola G., Sin W. J., C.-N. Sun N. Design guidelines for suppressing distortion and buckling in metallic thin-wall structures built by powder-bed fusion additive manufacturing. *Sridhar. Materials & Design*. 2022; 215.
9. Zemlyakov E. V., Alymov N. R., Vildanov A. M., Babkin K. D., Ivanov S. Yu., Kislov N. G., Tarasov D. S., Myatlev A. S., Ivanovsky A. A. Application of Laser and Additive Technologies in the Manufacturing of Advanced Industrial Gas Turbine Units. *Photonics Russia*. 2022;16(6):436–452. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.6.436.452.
10. Deng D., Murakawa H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements. *Computational Materials Science*. 2006; 37:269–277.

## АВТОРЫ

Ковчик А. Ю., Институт лазерных и сварочных технологий Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (ИЛИСТ СПбГМТУ), Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID 0000-0001-5494-2405  
Вильданов А. М., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID 0000-0002-7319-0605  
Алымов Н. Р., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID 0000-0003-1066-1446  
Иванов С. Ю., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID 0000-0002-0077-2313  
Мендагалиев Р. В., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID 0000-0003-4358-1995

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

## ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива.

final data and does not exceed  $\pm 2$  mm. It indicates the viability of the calculation model, and positively characterizes the use of computer modeling for predicting and compensating for deformations of products during direct laser deposition.

## CONCLUSIONS

Depending on the rigidity of the product structure, the necessary and sufficient volume of preliminary preparation and compensation method changes. The ring, which is an example of a product with high constructional rigidity, requires only compensation for thermal shrinkage. The outer shell is an easily deformable thin-walled part, requiring complex preparation using computer modeling.

Using the computer modeling of the stress-strain state of a part is advisable for easily deformable products, such as thin-walled shells which deviation pattern and deformation degree is difficult to predict. In combination with deformation compensation methods, computer modeling allows reducing the number of iterations of the direct laser deposition process for easily deformable products.

The technological process must necessarily provide for heat treatment of the part. However, it is important to select the parameters for maintenance correctly; otherwise, the relaxation of residual stresses will not occur fully, which will cause additional deformations after separation of the product from the substrate.

## FUNDING

The reported study was funded by RFBR, according to the research project No 20-38-90206.

## AUTHORS

Kovchik A. Yu., Saint Petersburg State Marine Technical University Institute of Laser and Welding Technologies (SMTU ILWT), St. Petersburg, Russia.  
ORCID 0000-0001-5494-2405  
Vildanov A. M., SMTU ILWT, St. Petersburg, Russia.  
ORCID 0000-0002-7319-0605  
Alymov N. R., SMTU ILWT, St. Petersburg, Russia.  
ORCID 0000-0003-1066-1446  
Ivanov S. Yu., SMTU ILWT, St. Petersburg, Russia.  
ORCID 0000-0002-0077-2313  
Mendagaliyev R. V., SMTU ILWT, St. Petersburg, Russia.  
ORCID 0000-0003-4358-1995

## CONFLICT OF INTEREST

The authors state that they have no conflict of interest. All the authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.

## CONTRIBUTION OF THE MEMBERS OF THE AUTHOR'S TEAM

The article is based on the work of all members of the author's team.

12-14 НОЯБРЯ

УФА 2024



## РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ


Международные  
специализированные выставки

- МАШИНОСТРОЕНИЕ
- МЕТАЛЛООБРАБОТКА
- ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПОТЕНЦИАЛ УФЫ

**[www.prombvk.ru](http://www.prombvk.ru)**

Место проведения:  
Выставочный комплекс  
г.Уфа, ул. Менделеева 158

 prombvk

 promexpoufa



Организаторы:



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ,  
ЭНЕРГЕТИКИ И ИННОВАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



АДМИНИСТРАЦИЯ  
ГОРОДСКОГО ОКРУГА г. УФА  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



Поддержка



МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



РОССИЙСКАЯ  
АССОЦИАЦИЯ  
«СТАНКОИНСТРУМЕНТ»

Партнер деловой  
программы



НАУПР  
Национальная Ассоциация  
Участников Плана Развития

Технический  
партнер



Медиа02  
техническое сотрудничество  
с медиа

Реклама. ООО «БВК» 0278179329





**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**100% ГАРАНТИЯ**  
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер  
Периодичность: 10 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)

# ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.lastmile.ru](http://www.lastmile.ru)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.ru](http://www.nanoindustry.ru)



Стоимость 1800 р. за номер  
Периодичность: 4 номера в год  
[www.stankoinstrument.ru](http://www.stankoinstrument.ru)