

Оригинальное исследование

УДК 621.791.92

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_375

EDN: GTHNVG

Конструктивные методы минимизации остаточных напряжений при прямом лазерном выращивании

С.Ю. Иванов

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Зачастую в процессе изготовления изделий из закаливающих сплавов методами аддитивного производства происходит их разрушение. Причиной этого является неблагоприятное сочетание металлургических факторов и высокий уровень возникающих напряжений. При изготовлении крупногабаритных промышленных конструкций методом прямого лазерного выращивания невозможно обеспечить получение благоприятного структурно-фазового состава и механических свойств наплавляемого металла вследствие низкой межпроходной температуры и высоких скоростей охлаждения. В таком случае для предотвращения разрушения конструкции необходимо снизить уровень напряжений и деформаций.

Цель работы — теоретический анализ эффективности использования методов локального изменения геометрии наплавки, а также локального изменения химического состава, для снижения остаточных напряжений и деформаций наплавки, симулирующих условия получения крупногабаритных конструкций методами прямого лазерного выращивания.

Методы. Анализируются наплавки типа стенка из сплава Ti-6Al-4V с двумя вариантами галтелей на торцах: плоскими и вогнутыми. Также рассмотрена наплавка типа стенка без галтелей с градиентным переходом от мягкой прослойки из чистого титана к существенно более прочному сплаву Ti-6Al-4V. Для определения напряжений и деформаций в наплавках была разработана численная модель процесса прямого лазерного выращивания. Последовательно связанные задачи теплопроводности в нестационарной постановке и квазистационарная задача термопластичности были решены методом конечных элементов.

Результаты. Добавление плоских галтелей на торцах наплавки оказывают незначительное влияние на величину остаточных напряжений и накопленных пластических деформаций. Вогнутые галтели приводят к существенному снижению пластических деформаций, обеспечивая получение бездефектной наплавки. Наибольшую эффективность показал подход, связанный с добавлением менее прочной, но более пластичной прослойки между жесткой подложкой и наплавкой из более прочного сплава. В этом случае максимальный уровень накопленных пластических деформаций достигается на торцах наплавки в области мягкой прослойки и мало зависит от протяженности прослойки. Более прочная часть наплавки из сплава Ti-6Al-4V практически не претерпевает пластического деформирования.

Выводы. Используя методы численного моделирования продемонстрирована возможность существенного снижения остаточных напряжений и пластических деформаций в наплавках, получаемых прямым лазерным выращиванием, за счет использования методов локального изменения геометрии наплавки, а также локального изменения химического состава.

Ключевые слова: аддитивное производство; прямое лазерное выращивание; остаточные напряжения; метод конечных элементов; титановые сплавы.

Как цитировать

Иванов С.Ю. Конструктивные методы минимизации остаточных напряжений при прямом лазерном выращивании // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 375–384. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_375 EDN: GTHNVG

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_375

EDN: GTHNVG

Design Methods Used to Minimize Residual Stresses in Direct Laser Deposition

Sergei Yu. Ivanov

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: In the additive manufacturing of hardening alloy products, they are often destroyed. This is caused by an unfavourable combination of metallurgic factors and high processing stresses. When manufacturing large-sized industrial structures by direct laser deposition, it is impossible to ensure a favorable phase structure and mechanical properties of the deposited metal due to the low interpass temperature and high cooling rate. In this case, to prevent structural damage, it is required to reduce stress and deformation.

AIM: To empirically analyze the efficiency of local deposit geometry and local chemical composition modification to reduce residual stresses and deposition deformations simulating the manufacturing of large-sized structures by direct laser deposition.

METHODS: We analyze wall-type deposits made of Ti-6Al-4V alloy with two types of fillets (flat and concave) on the ends. We also describe a wall-type deposit without fillets with a gradient transition from a soft layer of pure titanium to a significantly stronger Ti-6Al-4V layer. To determine stresses and deformations in deposits, a numerical direct laser deposition model was developed. Interlinked problems of heat conduction in a non-stationary formulation and the quasi-static problem of thermally-induced plasticity were solved by the finite element method.

RESULTS: The flat fillets added to the ends of the deposit has little effect on the magnitude of residual stresses and accumulated plastic deformations. Concave fillets significantly reduce plastic deformation, ensuring the manufacturing of defect-free deposits. The most effective approach was to add a less durable but more plastic interlayer between the rigid substrate and the deposit made of a stronger alloy. In this case, the highest level of accumulated plastic deformations is achieved at the ends of the deposit in the soft interlayer region and depends little on the interlayer length. The stronger part of the Ti-6Al-4V deposit has no effective plastic deformation.

CONCLUSION: It was demonstrated that numerical modeling using local deposit geometry and chemical composition modifications allow to significantly reduce residual stresses and plastic deformations in deposits manufactured by direct laser deposition.

Keywords: additive manufacturing; direct laser deposition; residual stresses; finite element method; titanium alloys.

To cite this article

Ivanov SYu. Design Methods Used to Minimize Residual Stresses in Direct Laser Deposition. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):375–384. DOI: [10.52899/24141437_2025_03_375](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_375) EDN: GTHNVG

ВВЕДЕНИЕ

Частую в процессе изготовления изделий методами прямого лазерного выращивания (ПЛВ) и селективного лазерного плавления (СЛП) происходит их разрушение [1]. Причиной этого является неблагоприятное сочетание металлургических факторов и высокий уровень возникающих напряжений. Стремление к повышению производительности процесса наплавки требует повышения скорости перемещения технологической головки, что приводит к увеличению скорости охлаждения наплавляемого металла. В результате при наплавке закаливающихся материалов, таких как титановые сплавы и высокопрочные стали, пластичность наплавляемого металла может снижаться практически до нуля [1, 2].

Множество работ было посвящено выбору оптимальных технологических параметров процесса, обеспечивающих формирование благоприятного структурно-фазового состава и высоких механических свойств [3, 4]. Предлагаемые подходы к решению данной задачи сводятся к определению оптимальной межпроходной температуры и демонстрируются при изготовлении наплавов небольших габаритов. При изготовлении крупногабаритных промышленных конструкций, когда время наплавки одного прохода может достигать 400 с [5], обеспечить заданный уровень межпроходной температуры невозможно. Отсюда следует простой вывод — если невозможно изменить структурно-фазовый состав наплавляемого металла, то для предотвращения разрушения наплавки необходимо снизить уровень напряжений и деформаций [6–8]. Для снижения временных и остаточных напряжений применяются различные подходы, которые можно разделить на технологические и конструкционные.

Технологический подход к снижению напряжений при АП основан на подборе оптимальной межпроходной температуры и оптимальной последовательности заполнения слоев. Как хорошо известно из сварочной практики, наличие равномерного подогрева свариваемой конструкции приводит к снижению уровня напряжений [9, 10]. Следует отметить, что данный подход применим только для конструкций небольшого размера, которые не успевают существенно охлаждаться в процессе наплавки проходов. Использование предварительного и/или сопутствующего подогрева при наплавке крупногабаритных конструкций сопряжено с большими трудностями и в настоящий момент не применяется. К технологическим подходам можно также отнести методы внешнего механического воздействия за счет высокоскоростного пластического деформирования наплавляемого изделия пневматическими молотами [11] или за счет обкатки роликами [12, 13]. Применение данного способа ограничивается рамными конструкциями небольшой высоты, обладающими высокой жесткостью.

К конструктивным методам снижения напряжений можно отнести:

1. Снижение жесткости подложки.

2. Локальное изменение геометрии наплавляемого изделия.
3. Локальное изменение химического состава наплавки т.е. формирование градиента механических свойств.

Первый подход сопряжен с рядом технологических трудностей. Так, в статье [8] отмечается, что использование гибкой подложки приводит к ее существенному деформированию и, как следствие, перемещению наплавки в процессе изготовления. Для снижения напряжений в наплавляемую конструкцию могут быть добавлены различные плавные переходы в местах концентрации напряжений, поддержки и ребра жесткости. Два последних варианта применимы для снижения остаточных деформаций тонкостенных оболочек [14–16], но не для снижения напряжений. Для снижения напряжений и деформаций при наплавке типа стенка можно к торцам добавить галтели различной геометрии. Другим способом снижения напряжений является использование переходного слоя из менее прочного, но более пластичного, сплава между жесткой подложкой и самой изготавливаемой конструкцией из сплава с низкой пластичностью. Технология ПЛВ позволяет получать заданную величину градиента химического состава и механических свойств непосредственно в процессе изготовления изделия [17].

Целью статьи является теоретический анализ эффективности использования предложенных методов локального изменения геометрии наплавки, а также локального изменения химического состава, для снижения остаточных напряжений и деформаций наплавов, моделирующих условия получения крупногабаритных конструкций методами ПЛВ. Анализируются наплавки типа стенка из сплава Ti-6Al-4V с двумя вариантами галтелей на торцах: плоскими и вогнутыми. Также рассмотрена наплавка типа стенка без галтелей с градиентным переходом от мягкой прослойки из чистого титана к существенно более прочному сплаву Ti-6Al-4V. Применение данных подходов при ПЛВ в условиях низкой межпроходной температуры, моделирующее наплавку реальных промышленных конструкций, в литературе не описано, а затрагиваемая проблематика является актуальной для внедрения технологии ПЛВ высокопрочных сплавов.

МЕТОДЫ

1. Геометрия наплавов

В раннее опубликованной автором статье [8] экспериментально и теоретически проанализировано поле остаточных напряжений и деформаций в наплавке из сплава Ti-6Al-4V размерами 70×3,2×28 мм (длина × толщина × высота), полученной методом ПЛВ в условиях, моделирующих изготовление крупногабаритной конструкции. В настоящей статье исследуется наплавка аналогичной длины и толщины, но удвоенной высоты (см. рис. 1, а), полученная в аналогичных

температурно-временных условиях. Прямое лазерное выращивание стенки осуществлялось на торце пластины толщиной 12 мм из сплава Ti-6Al-4V (рис. 1, *a*). Каждый наплавленный слой включал 1 проход высотой 0,56 мм и шириной 3,2 мм. Технологические параметры процесса ПЛВ были следующими: мощность лазерного излучения 2300 Вт; диаметр пятна 1,5 мм; амплитуда боковых колебаний луча 1,25 мм; скорость перемещения 30 мм/с; расход порошка 24 г/мин; расход газа 25 л/мин. Траектория наплавки образца предполагала выполнение всех проходов в одном направлении. После выполнения каждого прохода наплавка охлаждалась за счет конвекции и теплопроводности до температуры менее 100 °С.

Для минимизации напряжений и деформаций в рассматриваемой наплавке в местах концентрации напряжений на торцах стенки добавлены галтели, как показано на рис. 1, *c*, *d*. Анализируются следующие варианты галтелей: плоские галтели с катетом 14 и 28 мм (рис. 1, *c*); вогнутые галтели с радиусом 14 и 28 мм (рис. 1, *d*). В качестве альтернативного способа минимизации напряжений предложено выполнять несколько первых слоев, примыкающих к жесткой подложке, из сплава с меньшими прочностными свойствами, например, из технически чистого титана (CP-Ti Grade 2) (см. рис. 1, *b*). Рассматривается два варианта протяженности мягкой прослойки: 5 наплавленных слоев суммарной высотой 2,8 мм и 10 наплавленных слоев суммарной высотой 5,6 мм.

2. Численное моделирование процесса ПЛВ

Для определения напряжений и деформаций в процессе ПЛВ использована ранее предложенная и экспериментально верифицированная расчетная модель, краткое описание основных особенностей и допущений которой представлено ниже. Последовательно связанные задачи теплопроводности в нестационарной постановке

и квазистационарная задача термопластичности были решены методом конечных элементов (МКЭ). Поперечное сечение каждого из проходов представляло собой прямоугольник, размеры которого соответствовали замеренным по макрошлифу усредненной ширине и высоте проходов экспериментально полученной наплавки. Для моделирования процесса последовательной наплавки слоев была использована техника «рождения и смерти» элементов. Перед началом расчета элементы, соответствующие наплавленному металлу деактивировались. Последовательная активация элементов производилась согласно экспериментальной траектории наплавки изделия. Обработка полученных результатов и их визуализация производилась в программном обеспечении Matlab. Примеры расчетных сеток показаны на рис. 2. Как видно, расчетная сетка измельчена в области галтелей для точного учета их формы. Например, для наплавки с плоскими галтелями на торцах расчетная сетка содержала 168 680 гексаэдрных 8-узловых элементов и 181 194 узлов (см. рис. 2). Расчетное время в этом случае составило 133 часа для задачи теплопроводности и 216 часов для задачи механики деформируемого твердого тела при использовании 64 Gb RAM Windows PC с процессором AMD Ryzen Threadripper 1920X 12-core (3.50 GHz).

Модель мультилинейного изотропного упрочнения без учета ползучести была использована. Механические свойства наплавки из сплава Ti-6Al-4V были определены экспериментально [18] за исключением коэффициента Пуассона, принятого согласно [19]. Механические свойства подложки, изготовленной из деформированного сплава Ti-6Al-4V, отличались от наплавки только температурной зависимостью модуля Юнга, взятого из [19]. Температурные зависимости теплофизических свойств, таких как теплоемкость, теплопроводность, плотность, были взяты одинаковыми для всей модели согласно [20].

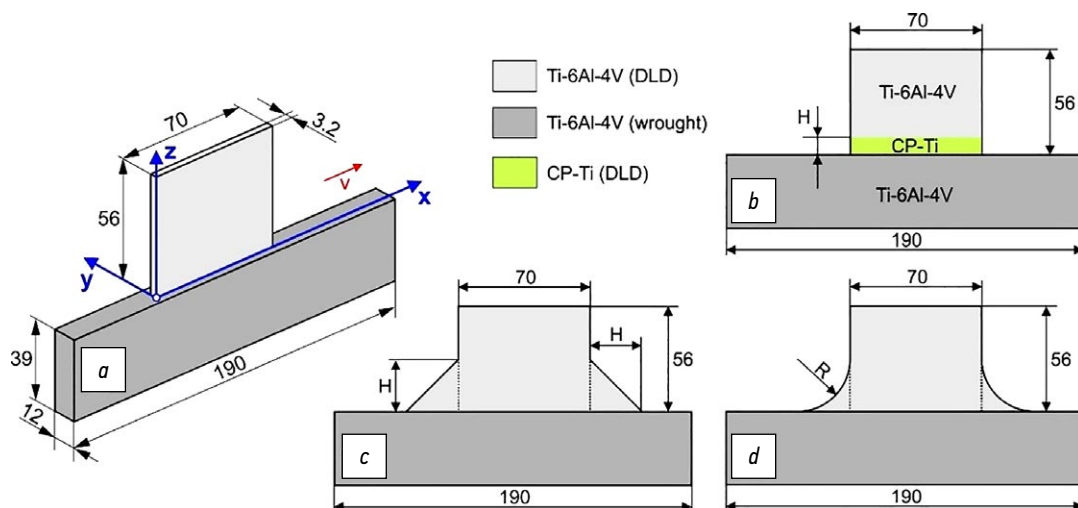


Рис. 1. Схемы вариантов анализируемых наплавок: базовый вариант (*a*); наплавка с мягкой прослойкой (*b*); наплавка с плоскими (*c*) и вогнутыми (*d*) галтелями.

Fig. 1. Alternative design layouts of the analyzed deposits: basic design (*a*); deposit with a soft interlayer (*b*); deposit with flat (*c*) and concave (*d*) fillets.

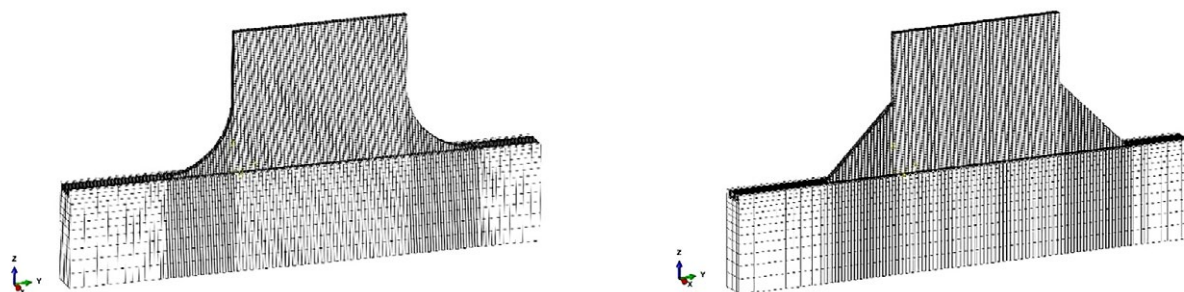


Рис. 2. Примеры конечно-элементных сеток, использованных в расчетах.
Fig. 2. Examples of finite element meshes used in designs.

Механические и теплофизические свойства технического чистого титана (Cr-Ti Grade 2) взяты из [20–22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Поле остаточных напряжений и деформаций при наплавке стенки без галтелей

Увеличение высоты наплавки в 2 раза по сравнению с ранее проанализированной в [8] не приводит

к изменению характера распределения продольных напряжений σ_x вблизи вершины наплавки (рис. 3, а). Основные изменения наблюдаются в средней части наплавки, где формируется область сжимающих напряжений σ_x . Практически во всем объеме наплавки продольные напряжения изменяются в пределах ± 200 МПа. Сравнение полученных полей нормальных напряжений σ_z (рис. 3, b, d) с представленными в [8] для наплавки высотой 28 мм показали, что увеличение высоты приводит к расширению области концентрации растягивающих напряжений σ_z ,

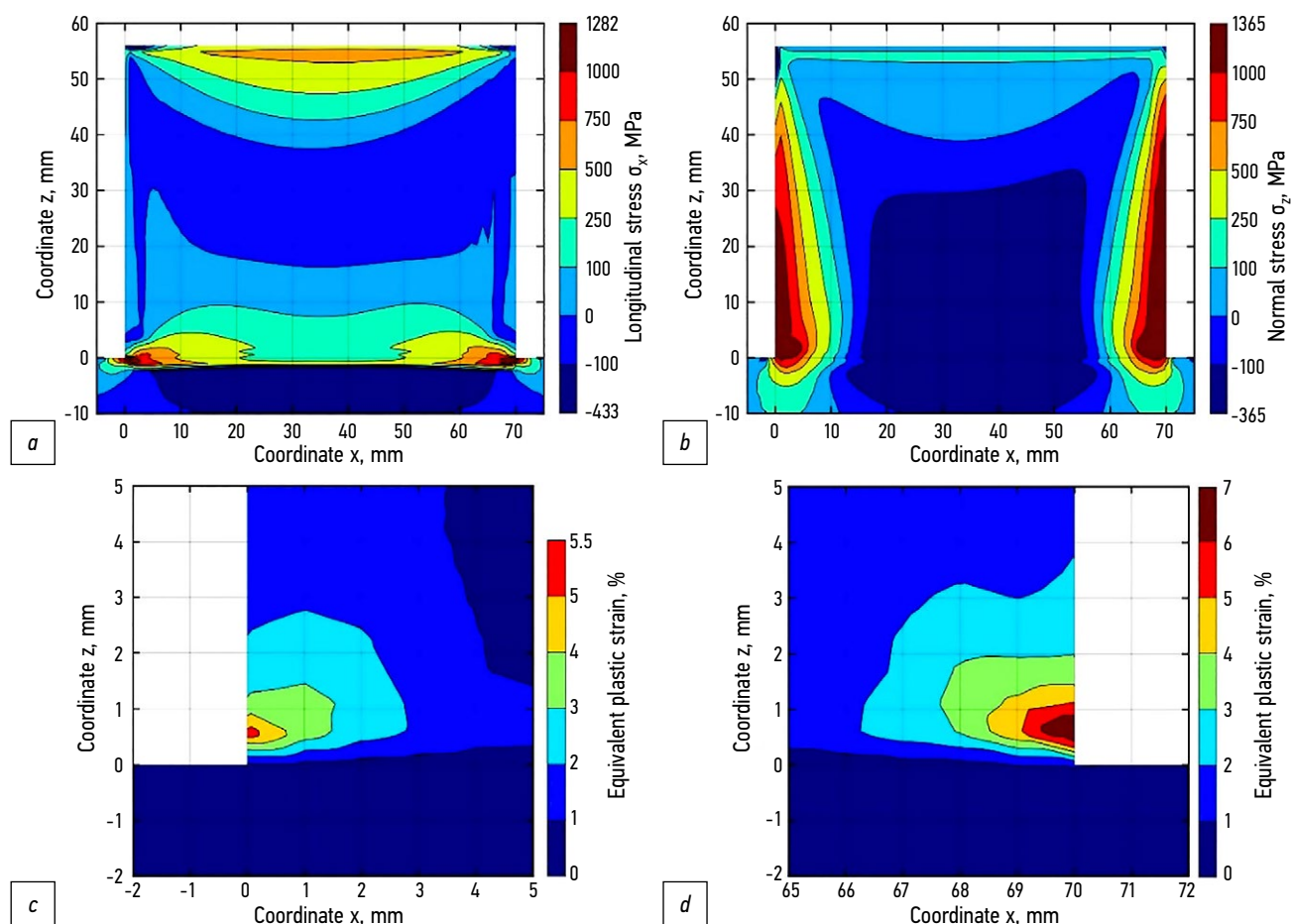


Рис. 3. Поля остаточных продольных (а) и нормальных (b) напряжений, накопленных пластических деформаций (c, d) в наплавке из сплава Ti-6Al-4V без галтелей.

Fig. 3. Fields of residual longitudinal (a) and normal (b) stresses and accumulated plastic deformations (c, d) in a Ti-6Al-4V deposit without fillets.

превышающих предел текучести. На левом торце, где начинается наплавка слоев, эта область достигает половины высоты наплавки, а на противоположном торце уже захватывает 80% высоты. Расширение областей растягивающих напряжений у торцов наплавки может быть уравновешено только за счет увеличения уровня сжимающих напряжений в центре наплавки. Накопленные пластические деформации при увеличении высоты стенки в два раза увеличиваются лишь на 1,1% (рис. 3, с, d). Максимальная величина деформаций, составляющая 7%, превышает пластичность сплава Ti-6Al-4V, полученного методом ПЛВ [18]. На практике локальная пластичность металла вблизи массивной подложки будет ниже, чем у остальной наплавки, вследствие более высокой скорости охлаждения. Это является причиной отрыва торцов наплавки от подложки.

2. Напряжения и деформации в наплавке с плоских галтелями на торцах

Добавление на торцах плоских галтелей не приводит к существенному изменению характера распределения продольных напряжений, как видно на рис. 4, а, с. Можно отметить уменьшение областей, в которых растягивающие напряжения σ_x превышают предел текучести. Вблизи поверхности галтелей формируются области растягивающих напряжений σ_x , не превышающих 600 МПа. Наибольшее изменение претерпевает распределение нормальных напряжений. Как видно из рис. 4, b, d, области концентрации растягивающих напряжений σ_z на торцах наплавки отдаляются от подложки на величину равную катету галтели. Причем чем больше величина катета, тем меньше размеры этих областей. Наличие

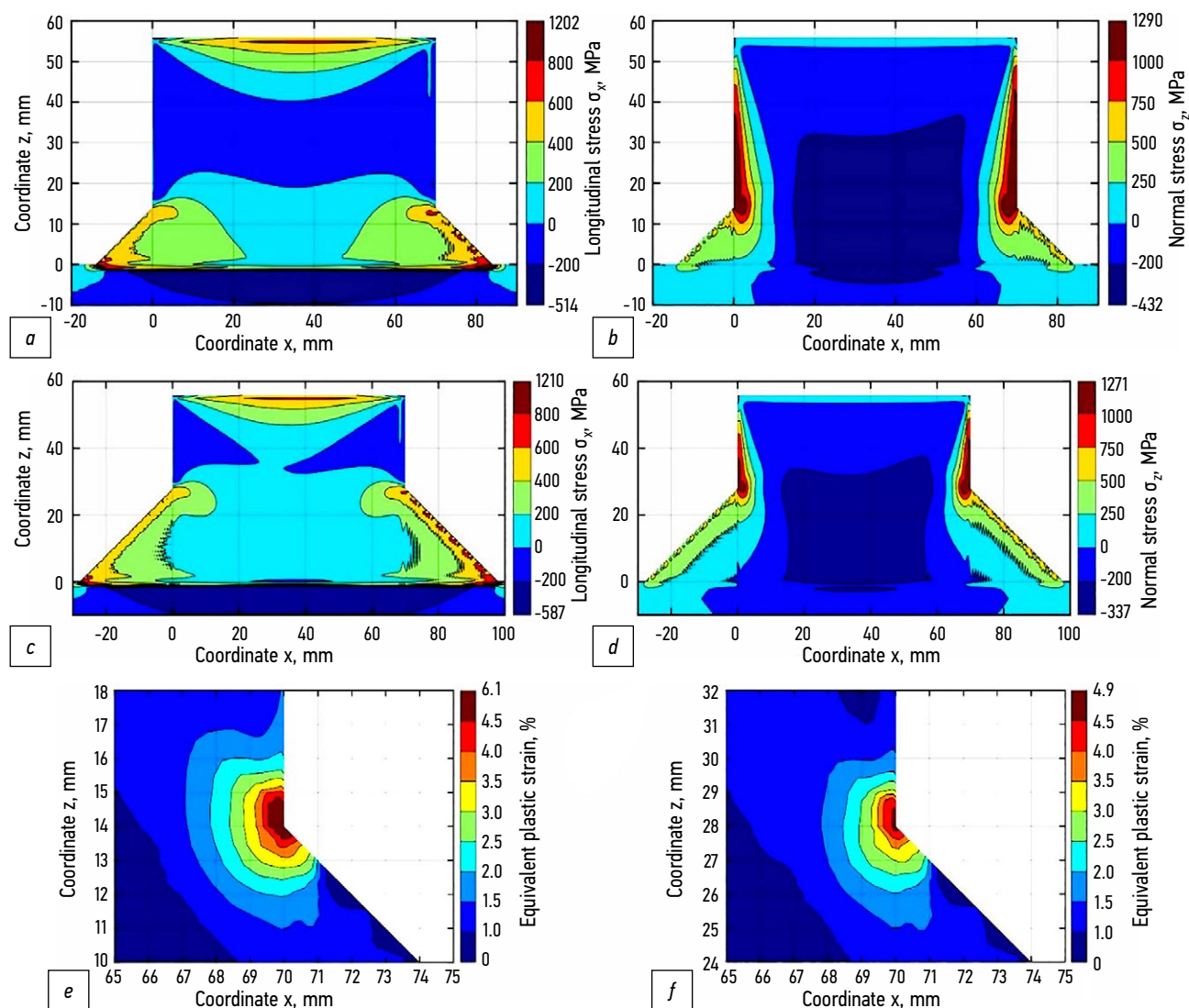


Рис. 4. Поля остаточных продольных (а, с) и нормальных (b, d) напряжений, накопленных пластических деформаций (e, f) в наплавке из сплава Ti-6Al-4V с плоскими галтелями катетом 14 мм (а, с, e) и 28 мм (b, d, f) на торцах.

Fig. 4. Fields of residual longitudinal (a, c) and normal (b, d) stresses and accumulated plastic deformations (e, f) in a Ti-6Al-4V deposit with flat fillets with a leg length of 14 mm (a, c, e) and 28 mm (b, d, f) at the ends.

галтелей оказывает незначительное влияние на величину накопленных пластических деформаций (рис. 4, e, f). Увеличение катета в 2 раза приводит к снижению пластических деформаций на 20%, а по сравнению с прямой стенкой — лишь на 30%. Удаление областей концентрации напряжений и деформаций от подложки должно оказать положительный эффект на пластичность наплавляемого металла за счет более плавного охлаждения. Недостатком данного конструктивного решения является необходимость наплавки значительного объема дополнительного металла.

3. Напряжения и деформации в наплавке с вогнутыми галтелями на торцах

Показанные на рис. 5, a, с поля продольных напряжений не отличаются по характеру распределения

от описанных п. 1 и 2. Можно отметить увеличение областей растягивающих напряжений, формирующихся вблизи перехода от галтелей к подложке. Из рис. 5, b, d видно, что области концентрации растягивающих нормальных напряжений и накопленных пластических деформаций смещены от подложки в вертикальном направлении. При радиусе галтели 14 мм смещение составляет примерно 8 мм, а при радиусе 28 мм уже 20 мм. Уровень пластических деформаций существенно ниже, чем в случае плоских галтелей. Вогнутые галтели приводят к снижению пластических деформаций по сравнению с наплавкой без галтелей в 2,8 раза при радиусе галтели 14 мм и в 5,83 раза при радиусе галтели 28 мм. Можно с уверенностью утверждать, что при наличии вогнутых галтелей разрушение наплавки не произойдет.

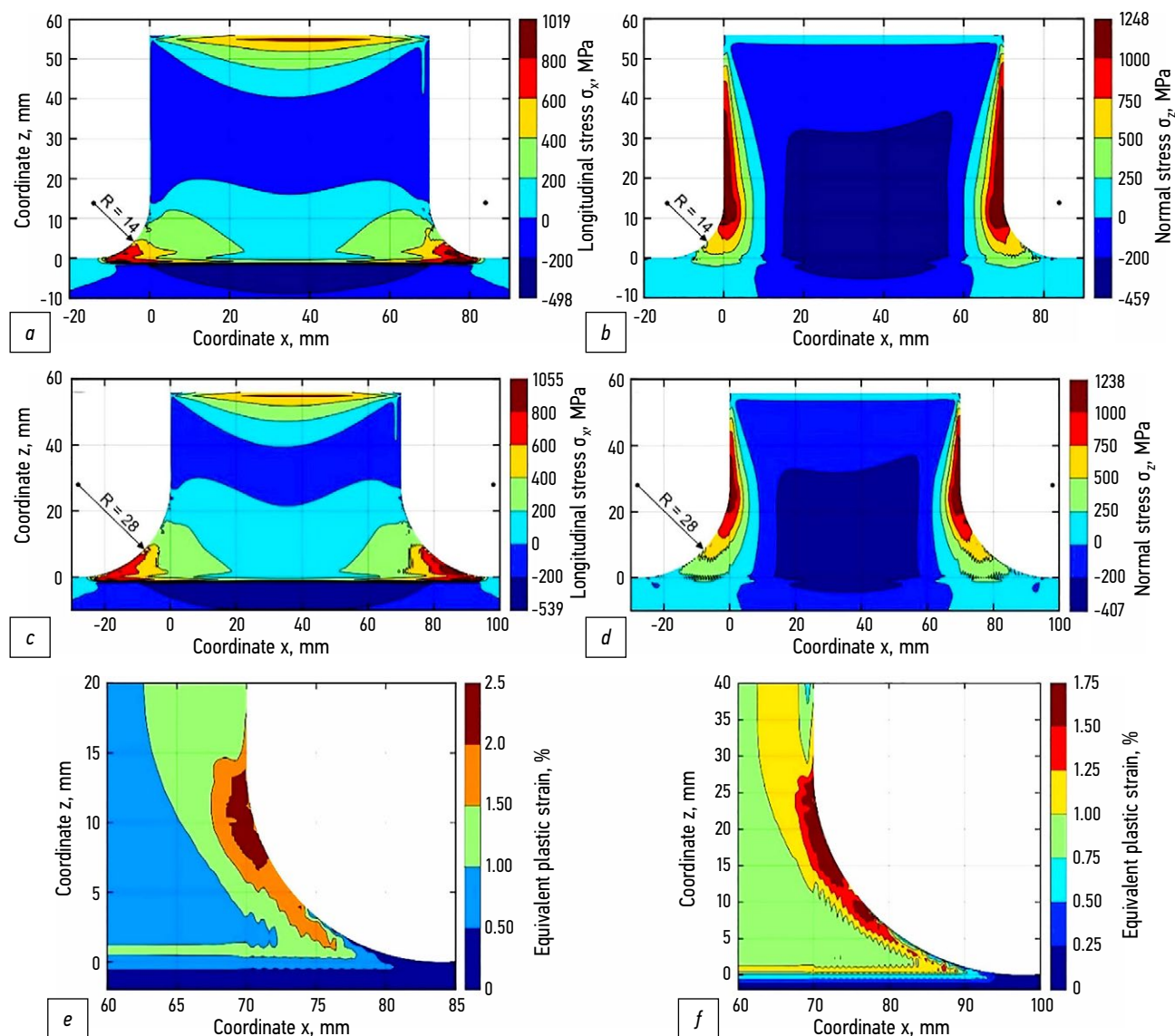


Рис. 5. Поля остаточных продольных (a, c) и нормальных (b, d) напряжений, накопленных пластических деформаций (e, f) в наплавке из сплава Ti-6Al-4V с вогнутыми галтелями радиусом 14 мм (a, c, e) и 28 мм (b, d, f) на торцах.

Fig. 5. Fields of residual longitudinal (a, c) and normal (b, d) stresses and accumulated plastic deformations (e, f) in a Ti-6Al-4V deposit with concave fillets with a radius of 14 mm (a, c, e) and 28 mm (b, d, f) at the ends.

4. Напряженно-деформированное состояние наплавки с градиентным переходом

Наличие менее прочной, но более пластичной прослойки приводит к неоднородному деформированию наплавки (рис. 6). Очаги пластического деформирования находятся на торцах наплавки в области мягкой прослойки из технически чистого титана, имеющей более низкое значение предела текучести, чем сплав Ti-6Al-4V. Накопленные пластические деформации здесь достигают 12,2% и мало изменяются при увеличении вдвое ширины прослойки. Поскольку экспериментально замеренная пластичность чистого титана, полученного ПЛВ, составляет 24,5% [22] можно предположить, что в данных областях не возникнет разрушение. Чем тоньше мягкая прослойка, тем больше величина градиента пластических деформаций и тем выше степень трехосности напряженного состояния. Более прочная часть наплавки из сплава Ti-6Al-4V практически не претерпевает пластического деформирования в обоих рассмотренных случаях. Уровень нормальных напряжений и протяженность областей концентрации нормальных напряжений в этой

части наплавки существенно меньше, чем в наплавке только из сплава Ti-6Al-4V (см. п. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плоские галтели оказывают незначительное влияние на величину остаточных напряжений и накопленных пластических деформаций. Увеличение катета в 2 раза с 14 мм до 28 мм приводит к снижению пластических деформаций на 20%, а по сравнению с наплавкой без галтелей — лишь на 30%. Удаление областей концентрации напряжений и деформаций от подложки на величину равную катету галтели должно оказать положительный эффект на пластичность наплавляемого в этой области металла за счет более плавного охлаждения.

Вогнутые галтели приводят к снижению пластических деформаций по сравнению с наплавкой без галтелей в 2,8 раза при радиусе галтели 14 мм и в 5,83 раз при радиусе галтели 28 мм. Можно с уверенностью утверждать, что при наличии вогнутых галтелей на торцах разрушение наплавки не произойдет.

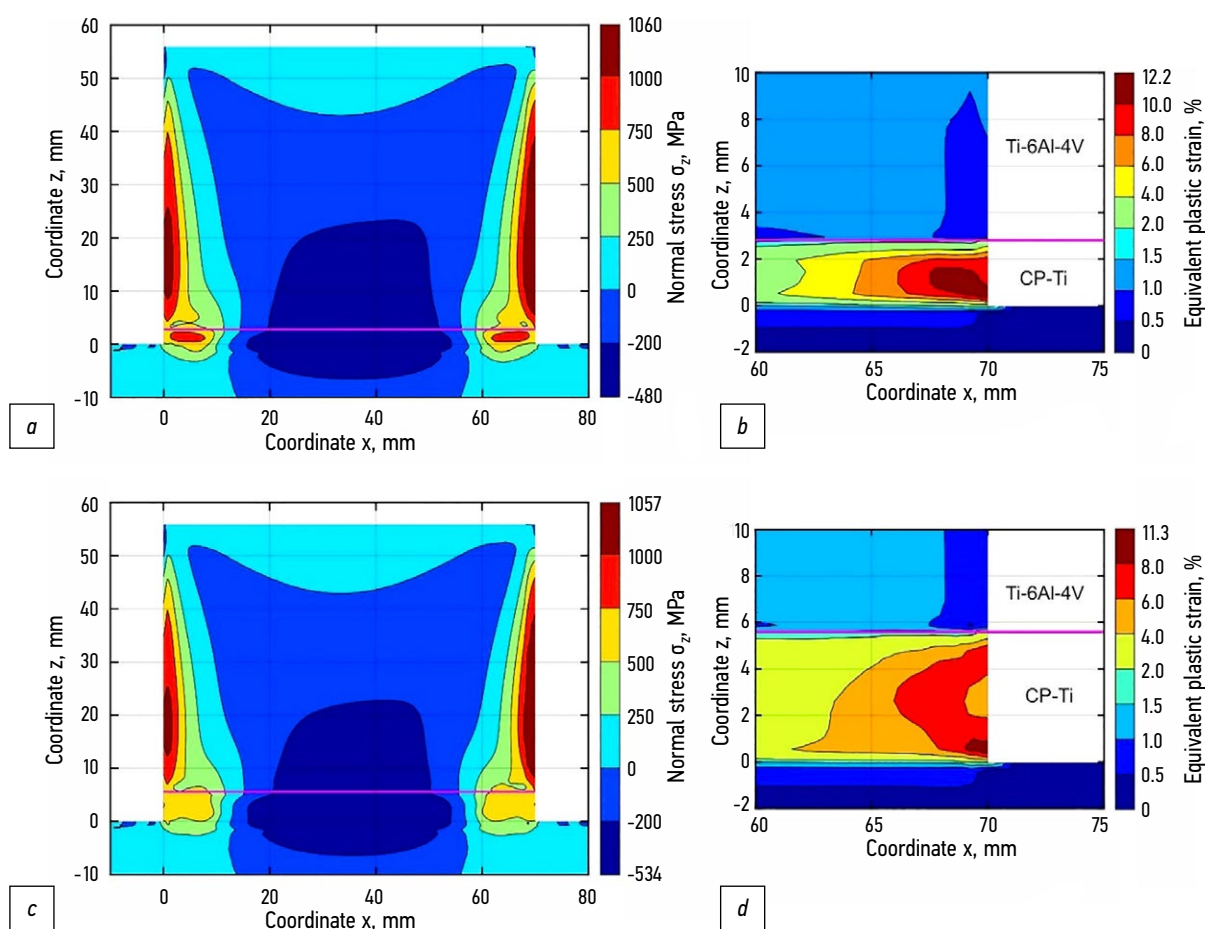


Рис. 6. Поля остаточных нормальных напряжений (a, c) и накопленных пластических деформаций (b, d) в наплавке с первыми 5 (a, b) и 10 (c, d) слоями из чистого титана.

Fig. 6. Fields of residual normal stresses (a, c) and accumulated plastic deformations (b, d) in a deposit with the first 5 (a, b) and 10 (c, d) layers of pure titanium.

Наличие менее прочной, но более пластичной прослойки между жесткой подложкой и наплавкой из более прочного сплава приводит к неоднородному деформированию наплавки. Максимальный уровень накопленных пластических деформаций достигается на торцах наплавки в области мягкой прослойки и мало зависит от протяженности прослойки. Более прочная часть наплавки из сплава Ti-6Al-4V практически не претерпевает пластического деформирования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.Ю. Иванов — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Автор несет ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источники финансирования. Исследование было профинансировано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (контракт № 075-15-2022-312 от 20 апреля 2022 г.).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Sergey Yu. Ivanov: investigation, writing—original draft, writing—review & editing, visualization, expert review, validation. The author approved the version of the manuscript to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the World-Class Research Center Program for Advanced Digital Technologies (contract No. 075-15-2022-312 dated April 20, 2022).

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one external reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., et al. Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties // *Prog Mater Sci*. 2018. Vol. 92, P. 112–224. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001 EDN: YIDPUX
2. Sames W.J., List F.A., Pannala S., et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *Int. Mater. Rev.* 2016. Vol. 61, N. 5. P. 315–360.
3. Song T., Dong T., Lu S.L., et al. Simulation-informed laser metal powder deposition of Ti-6Al-4V with ultrafine γ - β lamellar structures for desired tensile properties // *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 46. doi: 10.1016/j.addma.2021.102139 EDN: WVVVAC
4. Chen J., Fabijanic D., Zhang T., et al. Deciphering the transformation pathway in laser powder-bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy // *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 58. doi: 10.1016/j.addma.2022.103041 EDN: VMLDHD
5. Babkin K., Zemlyakov E., Ivanov S., et al. Distortion prediction and compensation in direct laser deposition of large axisymmetric Ti-6Al-4V part // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 94. P. 357–361. doi: 10.1016/j.procir.2020.09.145 EDN: MJGCHJ
6. Turichin G., Zemlyakov E., Babkin K., et al. Analysis of distortion during laser metal deposition of large parts // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 74. P. 154–157. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.068 EDN: LSGWIV
7. Gouge M., Michaleris P. *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
8. Ivanov S., Artinov A., Zemlyakov E., et al. Spatiotemporal evolution of stress field during direct laser deposition of multilayer thin wall of Ti-6Al-4V // *Materials*. 2022. Vol. 15, N. 1. doi: 10.3390/ma15010263 EDN: YQUHPT
9. Radaj D. *Heat effects of welding*. Berlin: Springer, 1992.
10. Masubuchi K. *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences*. Oxford: Pergamon, 1980.
11. Honnige J.R., Colegrove P., Williams S. Improvement of microstructure and mechanical properties in Wire + Arc Additively Manufactured Ti-6Al-4V with Machine Hammer Peening // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 216. P. 8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2018.02.083
12. Colegrove P., Coules H., Fairman J., et al. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213, N. 10. P. 1782–1791. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012
13. Honnige J.R., Colegrove P.A., Ganguly S., et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling // *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 22. P. 775–783.
14. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., et al. Mitigation of residual stresses and microstructure homogenization in directed energy deposition processes // *Engineering with Computers*. 2022. Vol. 38. P. 4771–4790. doi: 10.1007/s00366-021-01563-9 EDN: BCYCHE
15. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., et al. Substrate design to minimize residual stresses in Directed Energy Deposition AM processes // *Materials and Design*. 2021. Vol. 202. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109525 EDN: TZILGQ
16. Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Babkin K.D., Ivanov S.Y. Additive manufacturing of large parts. In: Pou J., Riveiro A., Paulo Davim J. (eds) *Additive Manufacturing*. Elsevier, 2021. P. 531–568.
17. Reichardt A., Shapiro A., Otis R., et al. Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials // *International Materials Reviews*. 2021. Vol. 66, N. 1. P. 1–29. doi: 10.1080/09506608.2019.1709354 EDN: YXAFMH

18. Ivanov S., Gushchina M., Artinov A., et al. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of a direct laser deposited ti-6al-4v // *Materials*. 2021. Vol. 14, N. 21. doi: 10.3390/ma14216432 EDN: NDMMSA
19. Mukherjee T., Zhang W., DebRoy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing // *Comput. Mater. Sci.* 2017. Vol. 126. P. 360–372. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.10.003
20. Mills K.C. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.

21. Moiseyev V.N. Titanium alloys: russian aircraft and aerospace applications. New York: CRC Press, 2005.
22. Gushchina M.O., Kuzminova Y.O., Dubinin O.N., et al. Multilayer composite Ti-6Al-4 V/Cp-Ti alloy produced by laser direct energy deposition // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023. Vol. 124. P. 907–918. doi: 10.1007/s00170-022-10521-8 EDN: QSNQIR

REFERENCES

1. DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, et al. Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties. *Prog Mater Sci.* 2018;92:112–224. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001 EDN: YIDPUX
2. Sames WJ, List FA, Pannala S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Review.* 2016;61(5):315–360.
3. Song T, Dong T, Lu SL, et al. Simulation-informed laser metal powder deposition of Ti-6Al-4V with ultrafine ?-? lamellar structures for desired tensile properties. *Additive Manufacturing.* 2021;46. doi: 10.1016/j.addma.2021.102139 EDN: WVVVAC
4. Chen J, Fabijanic D, Zhang T, et al. Deciphering the transformation pathway in laser powder-bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Additive Manufacturing.* 2022;58. doi: 10.1016/j.addma.2022.103041 EDN: VMLDHD
5. Babkin K, Zemlyakov E, Ivanov S, et al. Distortion prediction and compensation in direct laser deposition of large axisymmetric Ti-6Al-4V part. *Procedia CIRP.* 2020;94:357–361. doi: 10.1016/j.procir.2020.09.145 EDN: MJGCHJ
6. Turichin G, Zemlyakov E, Babkin K, et al. Analysis of distortion during laser metal deposition of large parts. *Procedia CIRP.* 2018;74:154–157. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.068 EDN: LSGWIV
7. Gouge M, Michaleris P. *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2017.
8. Ivanov S, Artinov A, Zemlyakov E, et al. Spatiotemporal evolution of stress field during direct laser deposition of multilayer thin wall of Ti-6Al-4V. *Materials.* 2022;15(1). doi: 10.3390/ma15010263 EDN: YQUHPT
9. Radaj D. *Heat effects of welding*. Berlin: Springer; 1992.
10. Masubuchi K. *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences*. Oxford: Pergamon; 1980.
11. Honnige JR, Colegrove P, Williams S. Improvement of microstructure and mechanical properties in Wire + Arc Additively Manufactured Ti-6Al-4V with Machine Hammer Peening. *Procedia Engineering.* 2017;216:8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2018.02.083
12. Colegrove P, Coules H, Fairman J, et al. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. *Journal of Materials Processing Technology.* 2013;213(10):1782–1791. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012
13. Honnige JR, Colegrove PA, Ganguly S, et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Additive Manufacturing.* 2018;22:775–783.
14. Lu X, Chiumenti M, Cervera M, et al. Mitigation of residual stresses and microstructure homogenization in directed energy deposition processes. *Engineering with Computers.* 2022;38:4771–4790. doi: 10.1007/s00366-021-01563-9 EDN: BCYCHE
15. Lu X, Chiumenti M, Cervera M, et al. Substrate design to minimize residual stresses in Directed Energy Deposition AM processes. *Materials and Design.* 2021;202. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109525 EDN: TZILGQ
16. Turichin GA, Klimova-Korsmik OG, Babkin KD, Ivanov SY. Additive manufacturing of large parts. In: *Pou J, Riveiro A, Paulo Davim J. (eds) Additive Manufacturing*. Elsevier; 2021:531–568.
17. Reichardt A, Shapiro A, Otis R, et al. Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials. *International Materials Reviews.* 2021;66(1):1–29. doi: 10.1080/09506608.2019.1709354 EDN: YXAFMH
18. Ivanov S, Gushchina M, Artinov A, et al. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of a direct laser deposited ti-6al-4v. *Materials.* 2021;14(21). doi: 10.3390/ma14216432 EDN: NDMMSA
19. Mukherjee T, Zhang W, DebRoy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing. *Comput. Mater. Sci.* 2017;126:360–372. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.10.003
20. Mills KC. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Cambridge: Woodhead Publishing; 2002.
21. Moiseyev VN. *Titanium alloys: russian aircraft and aerospace applications*. New York: CRC Press; 2005.
22. Gushchina MO, Kuzminova YO, Dubinin ON, et al. Multilayer composite Ti-6Al-4 V/Cp-Ti alloy produced by laser direct energy deposition. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023;124:907–918. doi: 10.1007/s00170-022-10521-8 EDN: QSNQIR

ОБ АВТОРЕ

Иванов Сергей Юрьевич,

научный сотрудник, Институт лазерных и сварочных технологий, соискатель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3; eLibrary SPIN: 1072-8503; e-mail: sergei.yu.ivanov@gmail.com

AUTHOR INFO

Sergei Yu. Ivanov,

Leading Research Associate, Institute of laser and welding technologies, Applicant, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3, Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1072-8503; e-mail: sergei.yu.ivanov@gmail.com