

Научная статья

УДК 621.9.04

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-72-83

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА НА ДЕФОРМАЦИЮ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Чжоу Минсяо

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы

* для корреспонденции: zhoumingxiao86@gmail.com



Информация о статье

Поступила:

16 января 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

10 июня 2025 г.

Принята к публикации:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:

лазерная селективная плавка, моделирование аддитивного производства, наклонные тонкостенные детали, толщина стенки, деформация тонкостенных изделий.

Аннотация.

В связи с проблемами значительной деформации и низкой точности при изготовлении наклонных тонкостенных деталей методом селективного лазерного плавления данная статья посвящена систематическому исследованию влияния толщины и угла наклона таких деталей на их деформационные характеристики. Проблемы, связанные с деформациями и неточностями в процессе лазерного плавления, значительно ограничивают возможность использования данного метода в производстве сложных и высокоточных деталей, таких как элементы для авиации и космических технологий. Для этого в статье предложено сочетание численного моделирования и экспериментальной валидации, что позволило получить точные и достоверные результаты. С использованием специализированного программного обеспечения проведен детальный численный анализ деформационного поведения тонкостенных деталей с различными значениями толщины и угла наклона. Моделирование позволило спрогнозировать основные тенденции деформации, а также выявить ключевые механизмы, влияющие на точность формообразования. Важным результатом стало понимание того, как изменение этих параметров может повлиять на конечную форму детали и ее прочностные характеристики. Для подтверждения достоверности этих результатов была выполнена серия точных лабораторных экспериментов, которые продемонстрировали высокую степень соответствия с расчетными данными. Эти эксперименты позволили выявить дополнительные факторы, которые могут влиять на точность процесса, а также предложить методы их минимизации. Исследование не только раскрыло конкретные механизмы влияния толщины и угла наклона на деформацию тонкостенных деталей, но и предоставило научные основы для оптимизации технологии селективного лазерного плавления. Полученные выводы позволяют значительно повысить точность изготовления тонкостенных деталей и расширить их применение в различных отраслях, таких как машиностроение, авиация, космическая отрасль и другие высокотехнологичные индустрии, где требуется высокая точность и надежность.

Для цитирования: Чжоу Минсяо. Исследование влияния угла наклона на деформацию тонкостенных деталей, изготовленных методом селективного лазерного плавления // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 72-83. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-72-83, EDN: PUXKBK

Введение. Тонкостенные детали обладают такими характеристиками, как малый вес и высокая удельная прочность, что делает их широко используемыми в аэрокосмической промышленности [1]. Обычно они изготавливаются традиционными методами, такими как литье, сварка, ковка и штамповка [2]. Однако в процессе обработки тонкостенных деталей возникают значительные прогибы, деформации и вибрации, что приводит к снижению точности размеров и качества поверхности [3]. Селективное лазерное плавление (SLM) является особой технологией

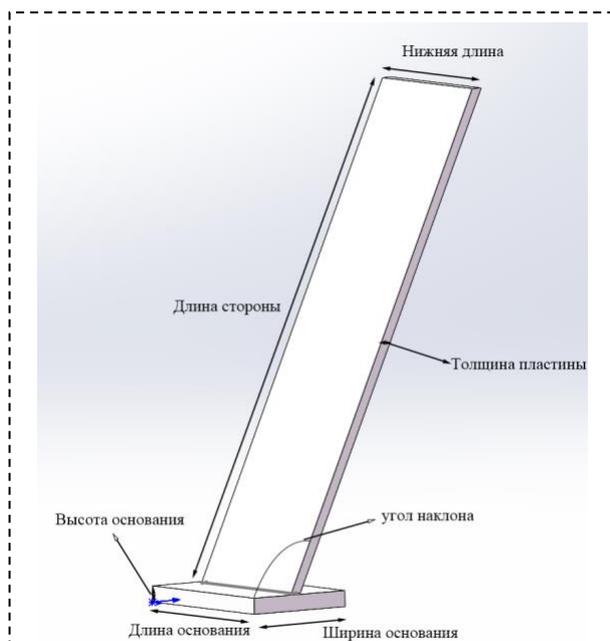


Рис. 1. Симуляционная модель тонкостенной детали

Fig. 1. Simulation Model of the Thin-Walled Part

быстрого прототипирования, 3D-печати или аддитивного производства (AM), которая предназначена для использования лазера с высокой плотностью энергии для плавления и сплавления металлического порошка. Этот процесс строит компоненты путем селективного плавления и сплавления порошка как внутри слоев, так и между ними [4]. Сегодня технология SLM широко используется в различных отраслях промышленности, медицине и исследовательских областях, предлагая ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами производства: более короткие сроки выхода на рынок, использование недорогих материалов, высокую производительность, multifunctionality, высокую точность деталей и возможность интеграции уникальных характеристик для обеспечения более функциональных деталей [5].

Из-за сложности формирования наклонных тонкостенных деталей методом SLM они

подвержены деформации, что вызвало большой интерес со стороны ученых по всему миру к исследованиям в этой области [6]. Cong Ni и соавторы изучили влияние угла наклона на остаточные напряжения, поведение уплотнения, микроструктуру и механические свойства в процессе селективного лазерного плавления (SLM) [7]. Baopeng Zhang и его коллеги изучили влияние размеров поддерживающей структуры и угла наклона на геометрические характеристики материала AlSi10Mg, полученного методом SLM [8]. Dafan Du и его команда исследовали влияние угла наклона на микроструктуру, прочностные и коррозионные характеристики образцов Inconel 718, изготовленных методом селективного лазерного плавления (SLM) [9]. Guillaume Meyer и соавторы провели исследование возможности производства наклонных тонкостенных решетчатых колонн из AlSi10Mg методом аддитивного производства [10]. SR Narasimharaju и его команда изучили влияние угла наклона на поверхность, ступенчатый эффект и характеристики частиц на деталях, изготовленных методом селективного лазерного плавления [11]. EE Covarrubias и его коллеги исследовали влияние угла построения на поверхностные свойства никелевых суперсплавов, обработанных методом SLM [12]. Zhichao Yang и его коллеги исследовали влияние угла наклона, кривизны и траекторий сканирования на точность и механические свойства наклонных тонкостенных деталей, изготовленных методом направленного энергетического напыления [13]. LinWenxian и его команда исследовали точность размеров тонкостенных изделий из PETG-Tough при различных углах наклона, изготовленных с использованием технологии FDM (моделирование методом плавящегося наплавления). Они проанализировали влияние высоты слоя, температуры экструзии и расстояния отступа на точность и определили основные факторы, влияющие на точность [14].

Таким образом, из-за необходимости проведения большого количества экспериментов при исследовании SLM этот процесс требует значительных временных и финансовых затрат. Моделирование и исследование процесса аддитивного производства с использованием метода конечных элементов (МКЭ) является удобным и эффективным [15]. В данной работе методом конечных элементов исследовано влияние толщины, высоты и угла печати на деформацию тонкостенных деталей, изготовленных методом SLM. Модель конечных элементов была разработана с использованием программного обеспечения ANSYS; основываясь на результатах экспериментов и моделирования, был определен оптимальный угол наклона тонкостенной детали.

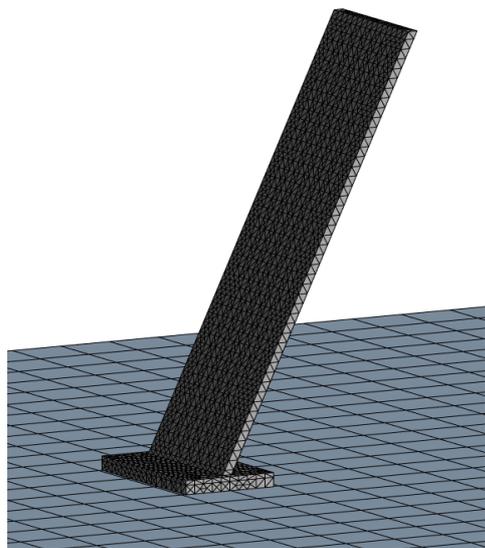


Рис. 2. Сеточное разбиение модели тонкостенной детали

Fig. 2. Mesh Partitioning of the Thin-Walled Part Model

Методы. Модель наклонной тонкостенной конструкции с углом наклона 65° , длиной боковой стороны 50 мм, длиной основания 15 мм и толщиной стенки 1 мм, показанная на Рис. 1, была создана с использованием программного обеспечения SOLIDWORKS. Чтобы предотвратить значительную деформацию наклонной тонкостенной детали в процессе печати, было добавлено основание длиной 17 мм, шириной 10 мм и толщиной 1,5 мм (деформация основания в данном исследовании не учитывается).

С помощью плагина ADDITIVE в программном обеспечении ANSYS SPACECLAM были выбраны размеры подложки и параметры мощности лазера, после чего

модель была импортирована в программное обеспечение ANSYS WORKBENCH. В модуле AM LPBF термоструктурного анализа были заданы параметры печати и тип печатного материала с использованием плагина LPBF, после чего была проведена тепловая оценка тонкостенной конструкции для получения температурного распределения по детали. В этом процессе плагин LPBF игнорировал траекторию сканирования лазера, моделируя одновременное формирование каждого слоя. Наконец, результаты теплового моделирования были переданы в механический модуль для расчета деформации.

Для упрощения моделирования процесса SLM методом конечных элементов были выдвинуты следующие допущения:

1. Предполагается, что порошковый слой является непрерывной и однородной средой, при этом теплопередача между порами порошка не учитывается.

2. Для упрощения расчетов игнорируется усадка порошкового слоя.

3. Считается, что поверхность расплава ровная, и влияние испарения и капиллярного течения не учитывается.

4. В процессе SLM основными механизмами теплопередачи являются теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. Для упрощения расчетов тепловое излучение игнорируется.

5. Предполагается, что используемый лазер имеет гауссово распределение интенсивности.

При разбиении модели на сетку необходимо учитывать баланс между точностью моделирования и эффективностью расчета. Вся модель разделена на две части: подложку и формируемую деталь. В качестве примера рассмотрим базовую тонкостенную деталь, используемую в данной работе. Сеточная разбивка тонкостенной части выполнена с использованием слоистых тетраэдров высотой 1 мм, тогда как для подложки использованы

Таблица 1. Параметры печати

Table 1. Printing Parameters

Параметры печати	
Параметр процесса	Значение параметра
Лазерная мощность / Вт	180
Скорость печати / (мм·с ⁻¹)	700
Толщина осаждения / мм	0.04
Расстояние между проходами / мм	0.04
Время между слоями / с	10
Коэффициент времени выдержки	1
Количество источников тепла	1
Температура предварительного нагрева / °С	100
Температура в комнате / °С	22
Печать материал	316 нержавеющая сталь
Материал подложки	316 нержавеющая сталь

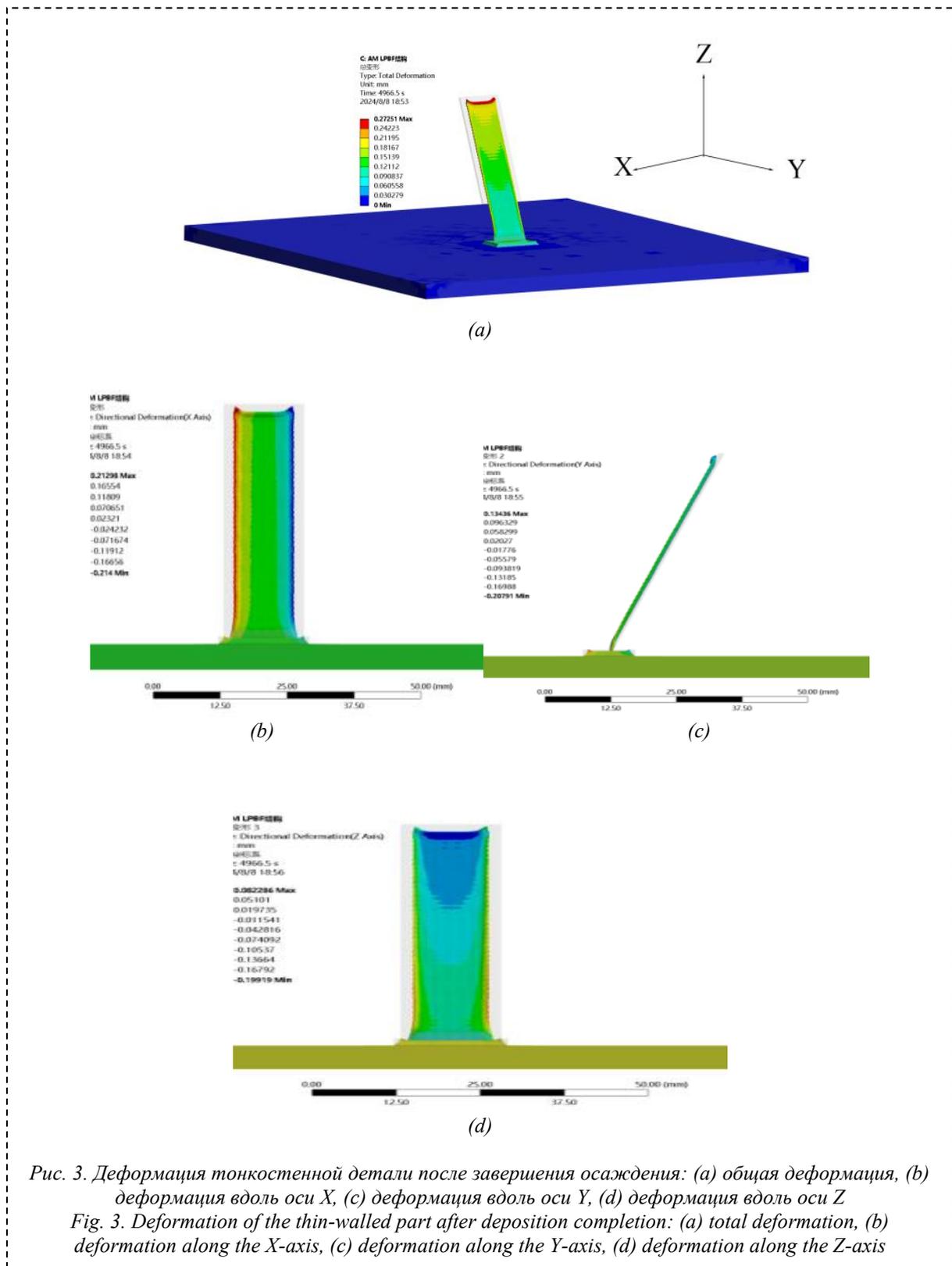


Рис. 3. Деформация тонкостенной детали после завершения осаждения: (а) общая деформация, (б) деформация вдоль оси X, (с) деформация вдоль оси Y, (д) деформация вдоль оси Z

Fig. 3. Deformation of the thin-walled part after deposition completion: (a) total deformation, (b) deformation along the X-axis, (c) deformation along the Y-axis, (d) deformation along the Z-axis

слоистые тетраэдры высотой 5 мм, как показано на Рис. 2. Параметры печати приведены в Таблице 1.

При моделировании процесса SLM особое внимание уделяется термическим и механическим свойствам материала при различных температурах, включая температуру

плавления, плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность, а также коэффициент Пуассона, коэффициент линейного расширения, предел текучести и модуль упругости, как показано на Рис. 3. В данном симуляционном эксперименте для подложки используется сталь 316L, а для порошка для обработки — порошок

Таблица 2. Химический состав 316L
Table 2. Chemical Composition of 316L

Элемент	Содержание (%)
Fe	Bal
Ni	11.93%
Cr	16.70%
Mo	2.02%
Mn	0.42%
Si	0.90%
C	0.04%
P	0.03%
S	0.03%

нержавеющей стали 316L (Таблица 2). Температура твердой фазы составляет 1399°C, температура жидкой фазы — 1450°C, коэффициент Пуассона равен 0.3.

Рис. 3 иллюстрирует распределение деформаций модели тонкостенной детали размером 15×1×50 мм с углом наклона 65°, охлажденной до комнатной температуры. Пунктирные линии на рисунке обозначают проектные контуры тонкостенной детали. Для лучшего отображения распределения деформаций масштаб коэффициента составляет 10. Рис. 3(a) демонстрирует итоговую деформацию детали, увеличенную в 10 раз.

Для подробного описания деформаций детали было установлено координатное пространство, как показано на Рис. 3, и деформации детали описаны в направлениях XYZ. Из Рис. 3 видно, что распределение деформаций в трех

направлениях значительно отличается. Для количественного описания степени деформации в направлениях XYZ используется конкретное значение:

$$\Delta F = \Delta f_{\max} - \Delta f_{\min}$$

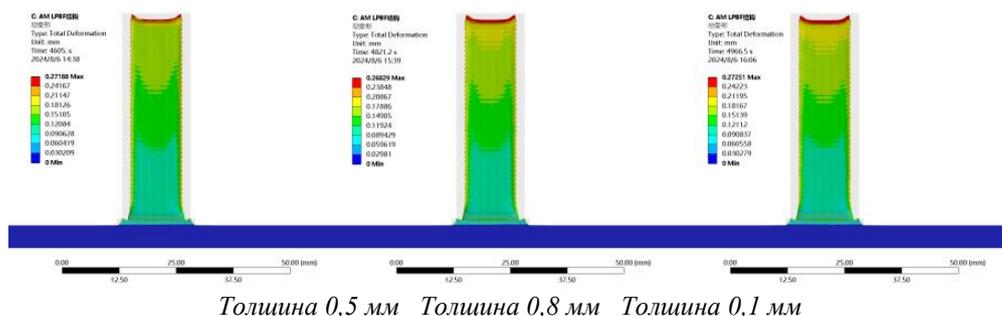
где: Δf_{\max} – максимальное значение деформации в положительном направлении оси XYZ. Δf_{\min} – максимальное значение деформации в отрицательном направлении оси XYZ. ΔF – максимальное значение деформации вдоль оси XYZ.

По деформациям вдоль оси X, как показано на Рис. 3(b), наблюдается, что вершина тонкостенной детали смещается вверх, обе стороны сжимаются внутрь, в то время как деформация в нижней части детали меньше. Деформация в нижней части детали явно меньше, чем в верхней части детали, $\Delta F(x) = 0,442$ мм. По деформациям вдоль оси Y, показанным на Рис. 3(c), верхняя часть детали наклоняется влево, а нижняя часть – вправо, $\Delta F(y) = 0,367$ мм. Рис. 3(d) показывает деформацию детали вдоль оси Z, где видно, что верхняя поверхность детали вогнута, с деформацией, направленной вниз в верхней части и в средней части тонкостенной детали, в то время как деформация в нижней части меньше, $\Delta F(z) = 0,222$ мм.

Влияние деформации вдоль оси X показано следующим образом: $\Delta F(x) / \text{длина основания} = 0,442 / 15 = 2,95\%$, что указывает на изменение в 2,95% от общей длины вдоль оси X. Влияние

Таблица 3. Таблица переменных углов печати для толщины 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм.
Table 3. Table of print angle variables for thicknesses of 0.5 mm, 0.8 mm, and 1 mm.

Переменные углы наклона, толщина 0,5 мм								
NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
Угол	80°	75°	70°	65°	60°	55°	50°	45°
Переменные углы наклона, толщина 0,8 мм								
NO.	9	10	11	12	13	14	15	16
Угол	80°	75°	70°	65°	60°	55°	50°	45°
Переменные углы наклона, толщина 1 мм								
NO.	17	18	19	20	21	22	23	24
Угол	80°	75°	70°	65°	60°	55°	50°	45°



Толщина 0,5 мм Толщина 0,8 мм Толщина 0,1 мм
Рис. 4. Моделирование общей деформации деталей различной толщины при угле наклона 65°.
Fig. 4. Simulation of overall deformation of parts with different thicknesses at a tilt angle of 65°.

деформации вдоль оси Y представлено так: $\Delta F(y) / \text{толщина} = 0,367 / 1 = 36,7\%$, что указывает на изменение в 36,7% от общей длины вдоль оси Y. Влияние деформации вдоль оси Z показано следующим образом: $\Delta F(z) / \text{высота} = 0,222 / 50 = 0,444\%$, что указывает на изменение в 0,444% от общей длины вдоль оси Z.

Используемые методы позволяют наглядно оценить влияние каждого направления на деформацию, что упрощает дальнейшие

сравнения.

Были разработаны три группы моделей, толщина каждой стенки в которых составляет 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм соответственно. Каждая группа включает восемь тонкостенных деталей с углами наклона, начинающимися от 80° и уменьшающимися с шагом 5° до 45°, как показано в Таблице 3.

На Рис. 4 представлены результаты моделирования общей деформации деталей при

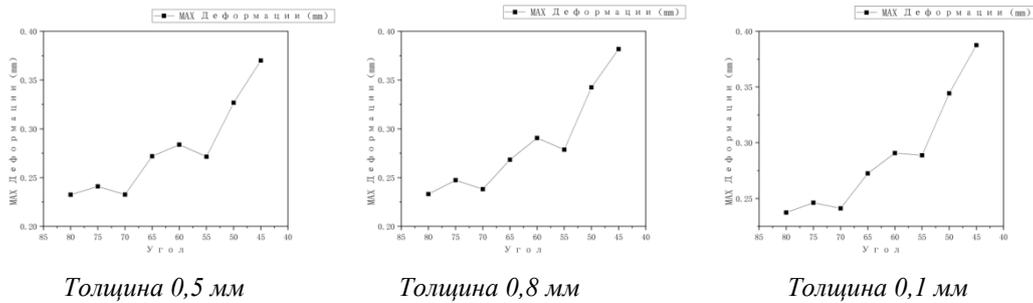


Рис. 5. График зависимости общей деформации деталей от изменения угла наклона при толщине тонкой стенки 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм

Fig. 5. Graph of the dependence of overall deformation of parts on the change in tilt angle for wall thicknesses of 0.5 mm, 0.8 mm, and 1 mm

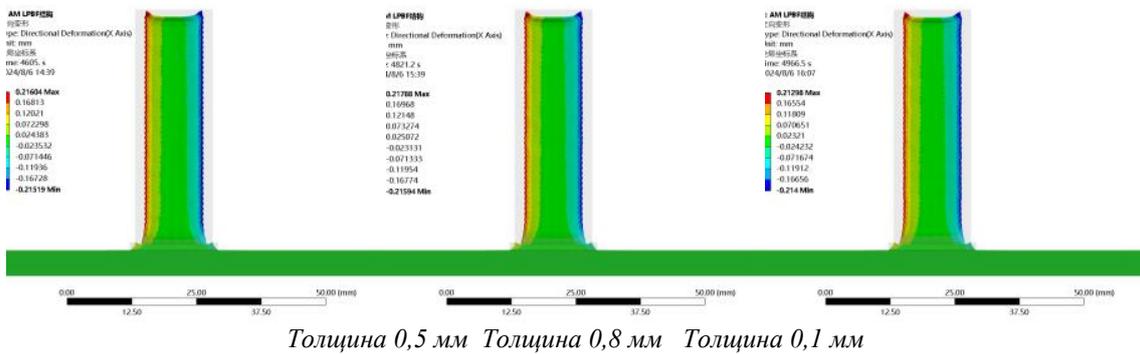


Рис. 6. Моделирование деформации деталей в направлении X при угле наклона 65° и различной толщине

Fig. 6. Simulation of deformation of parts in the X direction at a tilt angle of 65° and varying thicknesses

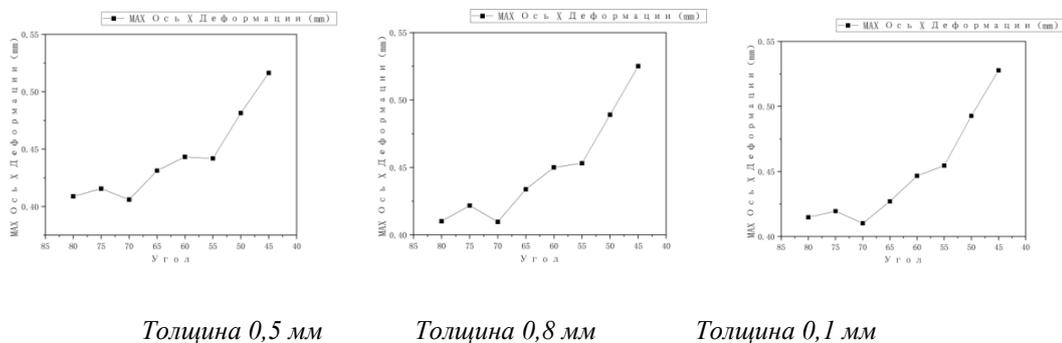
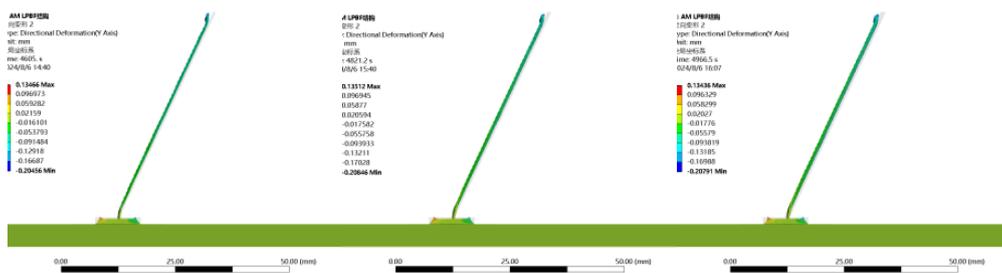


Рис. 7. График зависимости деформации деталей в направлении X от изменения угла наклона при толщине тонкой стенки 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм

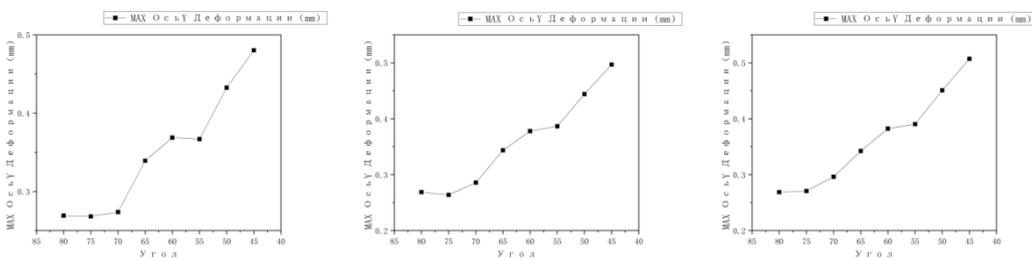
Fig. 7. Graph of the deformation of parts in the X direction as a function of the tilt angle for wall thicknesses of 0.5 mm, 0.8 mm, and 1 mm



Толщина 0,5 мм Толщина 0,8 мм Толщина 0,1 мм

Рис. 8. Моделирование деформации деталей в направлении X при угле наклона 65° и различной толщине

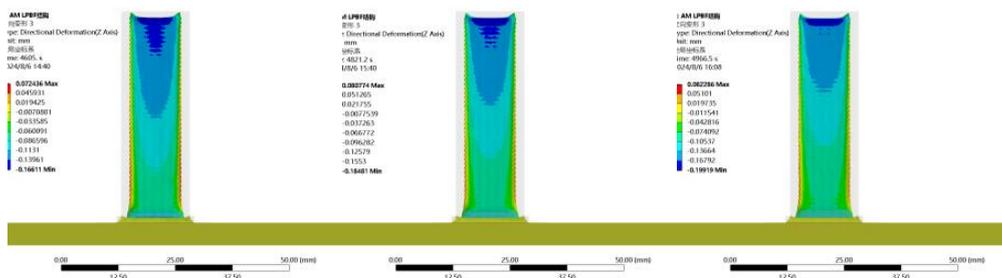
Fig. 8. Simulation of part deformation in the X direction at a tilt angle of 65° and varying thicknesses



Толщина 0,5 мм Толщина 0,8 мм Толщина 0,1 мм

Рисунок 9. График зависимости деформации деталей в направлении Y от изменения угла наклона при толщине тонкой стенки 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм.

Figure 9. Graph of the relationship between part deformation in the Y direction and the change in tilt angle for wall thicknesses of 0.5 mm, 0.8 mm, and 1 mm.



Толщина 0,5 мм Толщина 0,8 мм Толщина 0,1 мм

Рис. 10. Моделирование деформации деталей в направлении Z при угле наклона 65° и различной толщине

Fig. 10. Simulation of part deformation in the Z direction at a tilt angle of 65° and different thicknesses

длине тонкой стенки 15 мм, высоте 50 мм и толщине 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм, когда угол наклона составляет 65°. Распределение деформации во всех тонкостенных деталях схоже: в верхней и средней части детали деформация более выражена, вершины углов выступают наружу, а боковые стороны тонкостенной детали сжимаются внутрь. В нижней части деформация минимальна. Общая тенденция деформации представлена на Рис. 5, где видно, что в целом с уменьшением угла печати деформация тонкой стенки

увеличивается. В диапазоне углов печати 80°-55° увеличение деформации незначительно, однако при углах 55°-45° деформация значительно возрастает, как показано на Рис. 6. При толщине тонкой стенки 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм влияние изменения угла наклона на деформацию деталей демонстрирует схожие тенденции на графике.

На Рис. 6 показаны результаты моделирования деформации деталей в направлении X при длине тонкой стенки 15 мм, высоте 50 мм и толщине 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм, когда угол наклона составляет 65°.

Распределение деформации во всех тонкостенных деталях схоже: наибольшая деформация наблюдается на боковых сторонах и верхней части деталей, вершины углов выступают наружу, а боковые стороны стенки сжимаются внутрь. Деформация в нижней части минимальна.

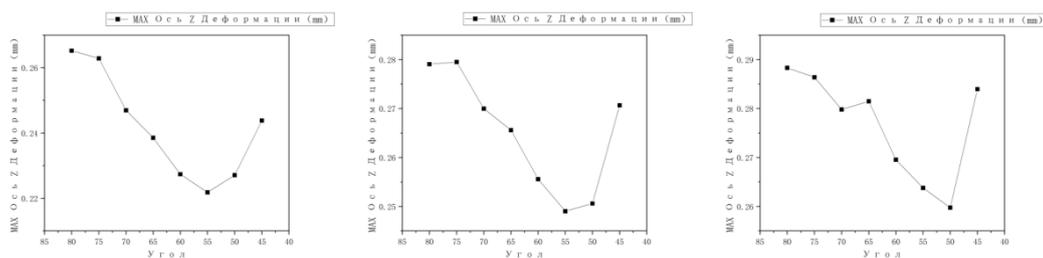
При толщине стенки 0,5 мм максимальная деформация составляет $0,516/15 = 3,44\%$ от длины нижней стороны и $139,565\%$ от общей максимальной деформации ($0,516/0,37$), с приростом деформации на $27,176\%$. При толщине стенки 0,8 мм максимальная деформация составляет $0,525/15 = 3,5\%$ от длины нижней стороны и $137,43\%$ от общей максимальной деформации ($0,525/0,382$), с приростом деформации на $28,17\%$. При толщине стенки 1 мм максимальная деформация составляет $0,528/15 = 3,52\%$ от длины нижней стороны и $136,08\%$ от общей максимальной деформации ($0,528/0,388$), с приростом деформации на $28,17\%$.

Тенденция деформации в направлении X показана на Рис. 7: видно, что с уменьшением угла печати деформация в направлении X

увеличивается. В диапазоне углов печати 80° - 55° увеличение деформации незначительно, но при углах 55° - 45° наблюдается значительное возрастание деформации. При толщине стенки 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм изменение угла наклона оказывает схожее влияние на деформацию деталей, как показано на графике.

На Рис. 8 показаны результаты моделирования деформации деталей в направлении Y при длине тонкой стенки 15 мм, высоте 50 мм и толщине 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм, когда угол наклона составляет 65° . Распределение деформации во всех тонкостенных деталях схоже: верхняя часть детали изгибается влево, а нижняя – вправо. С уменьшением угла деформация визуально усиливается.

При толщине стенки 0,5 мм максимальная деформация составляет $0,48/0,5 = 96\%$ от толщины и $129,73\%$ от общей максимальной деформации ($0,48/0,37$), с приростом деформации на $78,4\%$. При толщине стенки 0,8 мм максимальная деформация составляет $0,497/0,5 = 99,4\%$ от толщины и $130,1\%$ от общей максимальной деформации ($0,497/0,382$), с



Толщина 0,5 мм

Толщина 0,8 мм

Толщина 0,1 мм

Рис. 11. График зависимости деформации деталей в направлении Z от изменения угла наклона при толщине тонкой стенки 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм

Fig. 11. Graph of the dependence of part deformation in the Z direction on the change in tilt angle for wall thicknesses of 0.5 mm, 0.8 mm, and 1 mm



(a)

(b)

Рис. 12. (a) Изображение экспериментального образца L15 W0.8 H50 с углом наклона 80° и (b) Изображение экспериментального образца L15 W0.8 H50 с углом наклона 45°

Fig. 12. (a) Image of the experimental sample L15 W0.8 H50 with a tilt angle of 80° and (b) Image of the experimental sample L15 W0.8 H50 with a tilt angle of 45°

приростом деформации на 88,27%. При толщине стенки 1 мм максимальная деформация составляет $0,507/0,5 = 101,4\%$ от толщины и 130,67% от общей максимальной деформации (0,507/0,388), с приростом деформации на 88,62%.

Тенденция деформации в направлении Y показана на Рис. 9: видно, что с уменьшением угла печати деформация в направлении Y увеличивается. При толщине стенки 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм изменение угла наклона оказывает схожее влияние на деформацию деталей, как показано на графике.

На Рис. 10 представлены результаты моделирования деформации деталей в направлении Z при длине тонкой стенки 15 мм, высоте 50 мм и толщине 0,5 мм, 0,8 мм и 1 мм, когда угол наклона составляет 65°. Распределение деформации во всех тонкостенных деталях схоже: с уменьшением угла наклона темно-синяя область расширяется вниз от верхней части детали, а верх сжимается.

При толщине стенки 0,5 мм максимальная деформация составляет $0,265/50 = 0,53\%$ от высоты и 71,62% от общей максимальной деформации (0,265/0,37), с приростом деформации -19,56%. При толщине стенки 0,8 мм максимальная деформация составляет $0,497/0,5 = 99,4\%$ от толщины и 130,1% от общей максимальной деформации (0,497/0,382), с приростом деформации 88,27%. При толщине стенки 1 мм максимальная деформация составляет $0,288/50 = 0,576\%$ от высоты и 74,23% от общей максимальной деформации (0,288/0,388), с приростом деформации -9,9%.

Тенденция деформации в направлении Z показана на Рис. 11: видно, что с уменьшением угла печати деформация тонкостенной детали уменьшается, достигая минимального значения при угле печати 50°, а затем снова увеличивается.

Экспериментальная проверка

На основе оборудования для аддитивного производства Hanbang HBD-150 SLM были проведены эксперименты по печати с использованием параметров и материалов, указанных в Таблице 1. Печатались детали L15 W0.8 H50 с углами наклона 80° и 45°, полученные образцы показаны на Рис. 12. Измерения образца L15 W0.8 H50 с углом наклона 80° показали деформацию в направлении X на 0,42 мм (деформация по модели симуляции в направлении X составила 0,41 мм) и деформацию в направлении Z на 0,28 мм (деформация по модели симуляции в направлении Z составила 0,279 мм), что хорошо согласуется с результатами симуляции. Измерения образца L15 W0.8 H50 с углом наклона 45° показали деформацию в направлении X на 0,53 мм (деформация по

модели симуляции в направлении X составила 0,525 мм) и деформацию в направлении Z на 0,27 мм (деформация по модели симуляции в направлении Z составила 0,271 мм), что также хорошо согласуется с результатами симуляции. Эти экспериментальные результаты показывают, что предсказания деформаций по результатам симуляции, приведенные в данной статье, являются достаточно точными.

Результаты исследования

На основе вышеописанных трех серий моделирования и экспериментальных проверок можно сделать следующие выводы: с уменьшением угла печати общая деформация тонкостенных деталей, а также деформация в направлениях X и Y постепенно увеличиваются. В частности, в диапазоне углов от 80° до 55° рост деформации относительно медленный, в диапазоне от 55° до 45° скорость роста деформации значительно увеличивается.

Обсуждение

Эта тенденция может быть связана с изменением угла печати, что приводит к сложным изменениям в текучести расплавленного материала и процессе затвердевания. В то же время с уменьшением угла, деформация в направлении Z постепенно уменьшается, возможно, из-за различий в силе сцепления между слоями и особенностях осаждения расплавленного материала при различных углах. Эти результаты подчеркивают важность выбора угла печати для контроля деформации тонкостенных деталей, особенно в приложениях, где требуется высокая точность. Из трех направлений наибольшее влияние на деформацию в направлении Y оказывает толщина стенки. Увеличение толщины стенки может привести к значительному увеличению деформации в направлении Y. Этот результат указывает на необходимость учета физических свойств материала и параметров печати при проектировании и изготовлении, чтобы минимизировать деформацию в направлении Y, возможно, потребуется корректировка угла печати и стратегии заполнения между слоями для оптимизации стабильности и точности компонента.

Выводы

Таким образом, систематическое моделирование и экспериментальная проверка позволяют лучше понять и предсказать поведение деформации тонкостенных деталей при различных условиях печати, что предоставляет теоретическую основу и практические рекомендации для повышения управляемости и стабильности в процессе проектирования и производства. Эти результаты исследования являются важным ориентиром для дальнейшей оптимизации параметров 3D-печати и выбора материалов, способствуя широкому

применению и развитию технологии аддитивного производства в инженерной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yan B. [и др.] Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review // Chinese Journal of Aeronautics. 2022. Стр. 10–26.

2. Yao Y. [и др.] Оптимизация толщины стенки наклонных тонкостенных деталей из AlSi10Mg, сформированных методом SLM // Журнал инженерного колледжа Фуцзянь. 2022.

3. Mejbel M. K. [и др.] Улучшение производства тонкостенных деталей с использованием новой техники одновременного фрезерования с двух сторон // Международный журнал автомобильной и механической инженерии. 2022. № 19(1). С. 9519–9529.

4. Yur C.Y. [и др.] Обзор селективного лазерного плавления: Материалы и приложения // Обзоры прикладной физики. 2015. № 2(4).

5. Yadroitsev I. [и др.] Параметрический анализ процесса селективного лазерного плавления // Прикладная наука о поверхности. 2007. № 253(19). С. 8064–8069.

6. Chen S. [и др.] Исследование прогресса в формировании тонкостенных деталей методом лазерного выборочного плавления // Точная формовка инженерии. 2020. № 12 (15). С. 122–131.

7. Ni C. Влияние углов наклона на микроструктуру и механические свойства деталей из нержавеющей стали 316L, изготовленных методом селективного лазерного плавления (SLM) // Материалы Исследования Express. 2019. № 6(8). 086516.

8. Zhang B. [и др.] Влияние размера ребра и угла наклона на геометрические характеристики AlSi10Mg, изготовленного методом селективного лазерного плавления // Журнал быстрого прототипирования. 2021. № 27(5). С. 879–889.

9. Du D. [и др.] Влияние ориентации на микроструктуру, механические и коррозионные свойства Inconel 718, обработанного методом селективного лазерного плавления // Наука о материалах и инженерия. 2019. № А 760. С. 469–480.

10. Meyer G. [и др.] Исследование производственных возможностей наклонных решеток из AlSi10Mg с использованием метода селективного лазерного плавления // Письма о производстве. 2022. № 31. С. 101–105.

11. Narasimharaju S. R. [и др.] Характеризация текстуры поверхности металлической детали, изготовленной методом селективного лазерного плавления с различными наклонами поверхности // Журнал трибологии. 2021. № 143(5). 051106.

12. Covarrubias E. E., Eshraghi M. Влияние угла наклона на свойства поверхности никелевых суперсплавов, обработанных методом селективного лазерного плавления // Журнал производственных процессов. 2018. № 70. С. 336–342.

13. Zhichao Yang, Xuesong Chen, Lida Zhu. Сравнительное исследование методов формирования наклонных тонкостенных структур при направленной энергетической депозиции // Тонкостенные структуры. 2023. Том 191. 111074.

14. Lin Wenxian, Zhou Gongmiao, Ye Zongyi, Liu Wenwen, Chen Jie, Zhu Dehua, Cao Yu, Влияние параметров 3D-печати методом плавящегося наплавления на точность размеров тонкостенных изделий из PETG-Tough с различными углами наклона // Журнал пластиковой промышленности. 2024.

15. Schoinochoritis V. [и др.] Моделирование процессов аддитивного производства металлических порошков методом конечных элементов: критический обзор // Труды Института инженеров-механиков. Часть В: Журнал инженерного производства. 2017. 231(1) С. 96–117.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Чжоу Минсяо – аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, e-mail: zhoumingxiao86@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Чжоу Минсяо – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INCLINATION ANGLE ON THE DEFORMATION OF THIN-WALLED PARTS FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING

Zhou MingXiao

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia

* for correspondence: zhoumingxiao86@gmail.com



Article info

Received:

16 January 2025

Accepted for publication:

10 June 2025

Accepted:

20 June 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: laser selective melting, additive manufacturing modeling, inclined thin-walled parts, wall thickness, deformation of thin-walled products.

Abstract.

Due to the issues of significant deformation and low accuracy when manufacturing inclined thin-walled parts using selective laser melting, this article is dedicated to the systematic study of the influence of thickness and inclination angle of such parts on their deformation characteristics. The problems associated with deformations and inaccuracies in the laser melting process significantly limit the potential use of this method in the production of complex and high-precision parts, such as components for aviation and space technologies. To address this, the article proposes a combination of numerical modeling and experimental validation, which allowed for obtaining accurate and reliable results. A detailed numerical analysis of the deformation behavior of thin-walled parts with varying thickness and inclination angle was carried out using specialized software. The modeling predicted the main deformation trends and identified key mechanisms influencing shape accuracy. An important outcome was the understanding of how changes in these parameters can affect the final shape of the part and its mechanical properties. To verify the reliability of these results, a series of precise laboratory experiments were conducted, demonstrating a high degree of agreement with the calculated data. These experiments helped identify additional factors that may influence the process accuracy and proposed methods for minimizing them. The research not only revealed specific mechanisms by which thickness and inclination angle affect the deformation of thin-walled parts, but also provided scientific foundations for optimizing selective laser melting technology. The findings allow for a significant improvement in the accuracy of manufacturing thin-walled parts and broaden their application in various industries, such as mechanical engineering, aviation, space, and other high-tech sectors where high precision and reliability are required.

For citation: Zhou MingXiao. Investigation of the Influence of Inclination Angle on the Deformation of Thin-Walled Parts Fabricated by Selective Laser Melting. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):72-83. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-72-83, EDN: PUXKBK

REFERENCES

1. Yan B. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Pp. 10–26.
2. Yao Y. [et al.] Optimization of wall thickness in inclined thin-walled AlSi10Mg parts formed by SLM. *Journal of Fujian Engineering College*. 2022.

3. Mejbek M.K. [et al.] Enhancing the production of thin-walled parts using a novel technique of simultaneous double-sided milling. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2022; 19(1):9519–9529.

4. Yap C.Y. [et al.] Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015; 2(4).

5. Yadroitsev I. [et al.] Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science*. 2007; 253(19):8064–8069.

6. Chen S. [et al.] Research progress on forming thin-walled parts via selective laser melting. *Precision Engineering*. 2020; 12(5):122–131.

7. Ni C. [et al.] Effect of inclination angles on the microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting (SLM). *Materials Research Express*. 2019; 6(8):086516.

8. Zhang B. [et al.] Effect of rib size and inclination angle on the geometric characteristics of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2021; 27(5):879–889.

9. Du D. [et al.] Effect of orientation on the microstructure, mechanical, and corrosion properties of Inconel 718 processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering*. 2019; A, 760:469–480.

10. Meyer G. [et al.] Investigation of manufacturability of inclined lattice structures from

AlSi10Mg using selective laser melting. *Manufacturing Letters*. 2022; 31:101–105.

11. Narasimharaju S.R. [et al.] Surface texture characterization of metal parts fabricated by selective laser melting at various surface inclinations. *Journal of Tribology*. 2021; 143(5):051106.

12. Covarrubias E.E. Eshraghi M. Effect of inclination angle on surface properties of nickel-based superalloys processed by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018; 70:336–342.

13. Zhichao Yang [et al.] Comparative study on forming approaches in directed energy deposition of inclined thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*. 2023; 191:111074.

14. Lin Wenxian [et al.] Influence of FDM 3D printing parameters on the dimensional accuracy of thin-walled PETG-Tough parts with different inclination angles. *Plastic Industry Journal*. 2024.

15. Schoinochoritis B. Modeling additive manufacturing processes of metal powders using finite element methods: A critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017; 231(1):96–117.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Zhou Mingxiao – graduate student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia" (117198, Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6, e-mail: zhoumingxiao86@gmail.com)

Contribution of the authors:

Zhou Mingxiao – formulation of the research problem, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of the study, collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

