

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НА ДЕФОРМАЦИЮ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ SLM

Аннотация. Данное исследование направлено на всестороннее изучение закономерностей влияния геометрических размеров тонкостенных деталей на их деформацию в процессе селективного лазерного плавления (SLM) в аддитивном производстве металлических изделий. Особое внимание уделяется таким ключевым переменным, как длина, ширина и высота деталей. На их основе были построены три отдельные группы моделей, каждая из которых включает по восемь различных образцов с поэтапным увеличением указанных геометрических параметров для более точного анализа зависимости деформации от размеров конструкции. Для каждой группы моделей была проведена детальная численная симуляция процесса 3D-печати с использованием специализированного модуля ANSYS Additive LPBF, позволяющего учитывать тепловые и механические воздействия в процессе выращивания изделия. В ходе виртуального эксперимента собирались данные о напряжениях и деформациях по осям X, Y и Z, а также определялись значения совокупной деформации. Затем, основываясь на результатах моделирования, был организован реальный эксперимент по печати тех же моделей с целью проверки достоверности расчетов. Фактические измерения деформаций напечатанных деталей при разных сочетаниях переменных параметров позволили провести сравнение с данными симуляции. Анализ показал высокую степень совпадения между экспериментальными и расчетными результатами, что подтверждает точность применённого метода численного моделирования и его применимость для прогнозирования деформаций в процессе SLM-печати сложных тонкостенных компонентов.

Ключевые слова: аддитивное производство, селективное лазерное плавление (SLM), тонкостенные детали, анализ деформаций, метод конечных элементов (МКЭ).

1. Введение. Селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting, SLM) как передовая технология металлического аддитивного производства в последние годы широко применяется в аэрокосмической, автомобильной и медицинской промышленности [1–3]. Однако из-за сложности процесса SLM в ходе печати детали могут подвергаться термическим и остаточным напряжениям, что приводит к деформациям, особенно при изготовлении тонкостенных деталей [4, 5]. Поэтому изучение влияния геометрических размеров на деформацию тонкостенных деталей имеет важное теоретическое и инженерное значение для оптимизации параметров процесса SLM и повышения точности изготовления деталей.

Из-за сложности формирования наклонных тонкостенных деталей методом SLM и их склонности к деформациям, исследователи по всему миру провели множество исследований в этой области [6]. S. Clijsters и др. изучали стратегии локальной оптимизации параметров сканирования для построения тонкостенных структур в процессе SLM с целью повышения качества и плотности деталей [7]. Abele и др. исследовали применение технологии SLM для изготовления тонкостенных структур с определенными пористыми характеристиками и оптимизировали точность изготовления [8]. Li и др. изучали влияние

длины сканирования на изготовление тонкостенных деталей методом SLM и обнаружили, что длина сканирования в основном влияет на вторую пиковую температуру, а отклонение тонкостенных деталей примерно пропорционально длине сканирования [9]. Huang и др. исследовали термическое поведение тонкостенных структур без поддержек в процессе SLM, проанализировали влияние плотности порошкового слоя на распределение температуры, скорость охлаждения и размер расплавленной зоны, и обнаружили, что плотность порошкового слоя 60% наиболее благоприятна для формирования четкого контура расплавленной зоны и меньшего размера зерен [10]. Zhang и др. изучали управление деформацией крупногабаритных тонкостенных деталей, изготовленных методом SLM, предложили использование решетчатых структур с высокой удельной прочностью и жесткостью для контроля деформации и подтвердили их эффективность [11]. Lu и др. исследовали коробление тонкостенных структур, изготовленных методом лазерного плавления на порошковой подложке (LPBF), и экспериментально проанализировали влияние толщины стенки, высоты построения и геометрической формы на коробление, обнаружив, что увеличение толщины стенки и использование вертикальных ребер жесткости эффективно снижает остаточные деформации [12]. Wu

и др. изучали остаточные напряжения и управление деформацией тонкостенных образцов Inconel 718, изготовленных методом SLM, использовали метод сверления отверстий для измерения напряжений и подтвердили результаты с помощью термомеханического моделирования, обнаружив, что уменьшение толщины стенки снижает остаточные напряжения, но увеличивает деформацию, а парное изготовление образцов эффективно снижает остаточные напряжения и деформации [13]. Lin и др. исследовали влияние лазерных параметров и сложных структурных особенностей на изготовление бионических тонкостенных структур, подобных глазу омара, методом SLM, систематически проанализировали влияние мощности лазера на поведение уплотнения, точность размеров и шероховатость поверхности, и определили оптимальную мощность лазера для повышения качества формирования [14]. Ке и др. изучали эволюцию напряжений в тонкостенных деталях из титанового сплава, изготовленных методом SLM, создали термомеханическую модель конечных элементов для анализа влияния скорости сканирования лазера и толщины слоя на изменение напряжений, и обнаружили, что термические циклы могут снизить пиковые термические напряжения более чем на 30% [15].

Таким образом, использование конечно-элементного моделирования для исследования механизмов деформации в аддитивном производстве имеет значительную технико-экономическую эффективность. В данном исследовании на платформе ANSYS была создана численная модель для систематического изучения влияния

ключевых параметров процесса (включая толщину стенки, высоту формирования и угол наклона конструкции) на остаточные деформации в процессе селективного лазерного плавления. Метод, сочетающий численное моделирование и экспериментальную проверку, позволил определить оптимальный угол наклона, эффективно снижающий деформацию конструкции.

2. Конечно-элементная модель

2.1. Создание модели

В программном обеспечении SOLIDWORKS была создана симуляционная модель тонкостенной детали, как показано на рисунке 1. Размеры модели составляют: высота – 50 мм, длина нижней грани – 15 мм, толщина – 0,5 мм. Затем модель была импортирована в ANSYS SPACECLAIM, где с помощью плагина ADDITIVE были заданы размеры подложки, мощность лазера и другие параметры печати. После этого обработанная модель была импортирована в ANSYS WORKBENCH, где был выбран термомеханический модуль AM LPBF, а с помощью плагина LPBF были дополнительно настроены параметры материала и конкретные параметры печати.

В процессе теплового анализа плагин LPBF упростил моделирование, игнорируя траекторию сканирования лазера и предполагая, что каждый слой материала формируется одновременно, что позволило получить распределение температуры в тонкостенной детали. Наконец, результаты теплового анализа были переданы в механический модуль, где были рассчитаны деформация, напряжения и деформации тонкостенной детали.

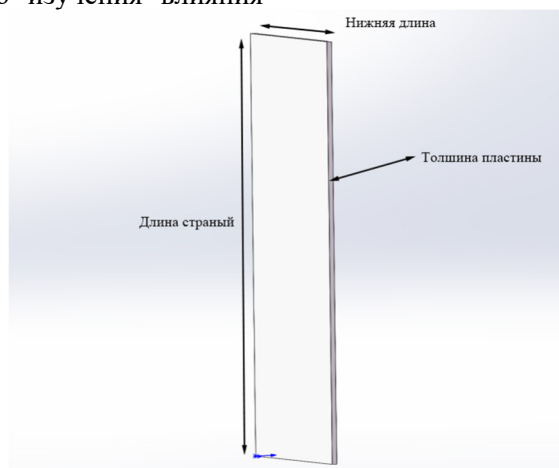


Рис 1. Модель тонкостенной детали для моделирования

Для повышения вычислительной эффективности численного моделирования процесса селективного лазерного плавления (SLM) в данном исследовании при построении конечно-элементной модели были приняты следующие допущения:

Упрощение теоретической модели: порошковый слой представлен в виде сплошной однородной среды, при этом игнорируется влияние теплопроводности на уровне отдельных частиц.

Упрощение формовочного процесса: не учитывается объемная усадка, вызванная уплотнением порошка в процессе формования.

Упрощение динамики расплавленной ванны: предполагается, что поверхность расплавленной ванны остается в идеальном плоском состоянии, игнорируются эффекты фазового испарения и капиллярного течения Маренго.

Упрощение механизма теплопередачи: основными механизмами теплообмена считаются теплопроводность и конвекция, при этом излучательный теплообмен не учитывается.

Упрощение ввода энергии: для описания распределения лазерной энергии используется гауссовская модель теплового источника.

2.2. Разбиение сетки и параметры печати

Стратегия разбиения сетки основана на методе комплексной оптимизации точности и эффективности, при котором расчетная область разделяется на зону формирования и зону подложки для дифференцированного дискретизации. С учётом геометрических особенностей базовой тонкостенной конструкции применяется схема локального уточнения сетки: в зоне формирования используется тетраэдрическая сетка с характерным размером

элемента 1 мм для высокой плотности разбиения, что позволяет точно отразить термомеханическое поведение расплава; в зоне подложки применяется тетраэдрическая сетка с характерным размером элемента 5 мм, что обеспечивает баланс между вычислительной точностью и эффективностью расчёта. Согласно исследованию Хи и др, для получения минимальной деформации тонкостенных образцов оптимальными являются параметры лазерного излучения в диапазоне мощности 100–200 Вт и скорости сканирования 800–1000 мм/с [16]. При таких параметрах деформации готовых тонкостенных деталей минимальны. В таблице 1 подробно приведена соответствующая система технологических параметров. Схема разбиения сетки по зонам представлена на рисунке 2.

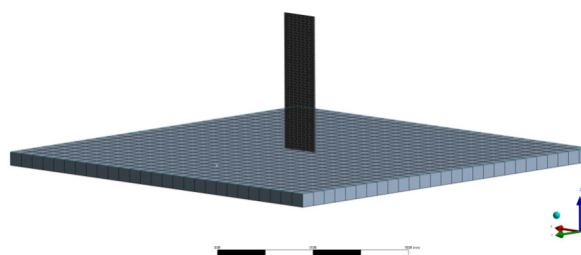


Рис 2. Разбиение сетки модели

Таблица 1

Параметры печати

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

2.3. Физические свойства материала

Точность численного моделирования процесса селективного лазерного плавления (SLM) в значительной степени зависит от корректного представления термомеханических параметров материала. В данном исследовании применен метод зонального параметрического моделирования: в анализе температурного поля основное внимание уделяется термофизическим параметрам, связанным с фазовыми превращениями, включая температуру плавления (1399 °С для твердой фазы / 1450 °С для

жидкой фазы), плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность. В анализе напряженно-деформированного состояния учитываются механические свойства, влияющие на формирование остаточных деформаций, включая модуль упругости, коэффициент Пуассона (0.3), коэффициент термического расширения и предел текучести. В качестве материала использована широко применяемая в аддитивных технологиях аустенитная коррозионностойкая сталь 316L, аналогичная отечественной марке 03X17H14M2. Эта сталь отличается высокой

коррозионной стойкостью, стабильными механическими свойствами и хорошей свариваемостью, что обеспечивает её популярность при производстве изделий методом SLM. Для моделирования использовалась 316L сталь в виде подложки и порошка, применяемого для построения изделия.

3. Характеристики распределения деформации тонкостенных деталей

На рисунке 3 показаны характеристики распределения деформации тонкостенной конструкции размером $15 \times 4 \times 50$ мм после охлаждения до комнатной температуры. Для наглядности деформация увеличена в 10 раз, пунктирная рамка обозначает проектный контур, а на рисунке 3(а) показана общая схема деформации.

Из рисунка 3 видно, что распределение деформации в направлениях XYZ значительно отличается, результаты деформации приведены в таблице 3. С помощью данного метода можно четко количественно оценить влияние каждого направления на деформацию тонкостенной детали, что облегчает последующее сравнение и анализ и предоставляет для оптимизации.

В рамках численного моделирования для повышения достоверности результатов была учтена послойная специфика процесса построения изделия. Геометрические параметры соответствуют реальным условиям печати методом SLM: толщина одного слоя составляет 0,04 мм, общая высота моделируемого изделия – 50 мм, что соответствует 1250 слоям. Схема послойного построения представлена на рисунке 4.

Таблица 3

Характеристики распределения деформации тонкостенных деталей

Анализ	Деформация по X	Деформация по Y	Деформация по Z
Иллюстрация	Рисунок 3(б)	Рисунок 3(с)	Рисунок 3(д)
Режим деформации	Значительное вогнутость с боков	Равномерное сжатие передней и задней поверхностей	Вогнутость верхней поверхности, значительный изгиб в центральной области верхней части, малая деформация внизу
Пространственное распределение	Верхняя часть деформируется больше, чем нижняя	Малая амплитуда общей деформации	Малая деформация внизу
Количественный анализ	0.42033 mm	0.28129 mm	0.318212 mm
Относительная деформация	2.8022 %	7.03225 %	0.636424 %

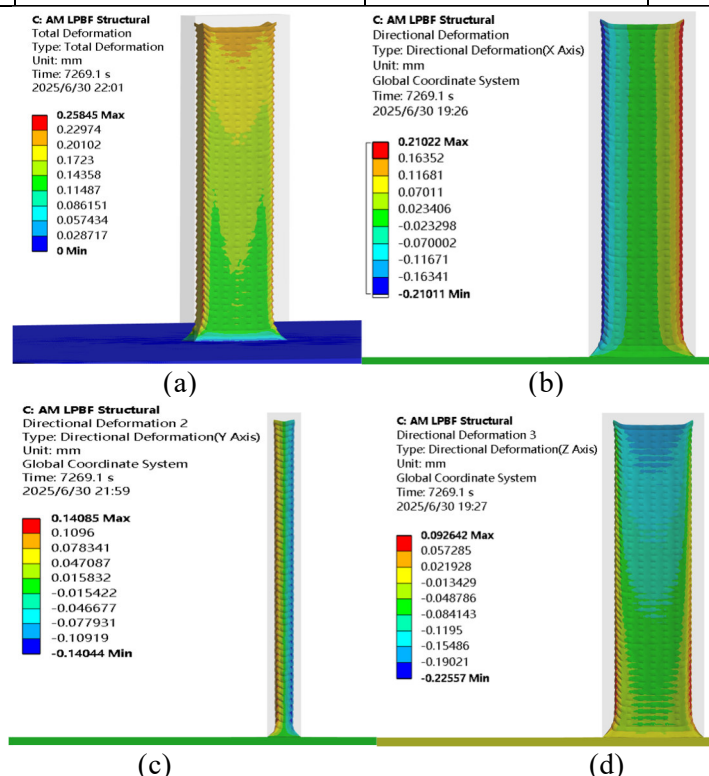


Рис 3. Деформация тонкостенной детали после завершения осаждения, 3(а) общая деформация, 3(б) деформация по X, 3(с) деформация по Y, 3(д) деформация по Z.

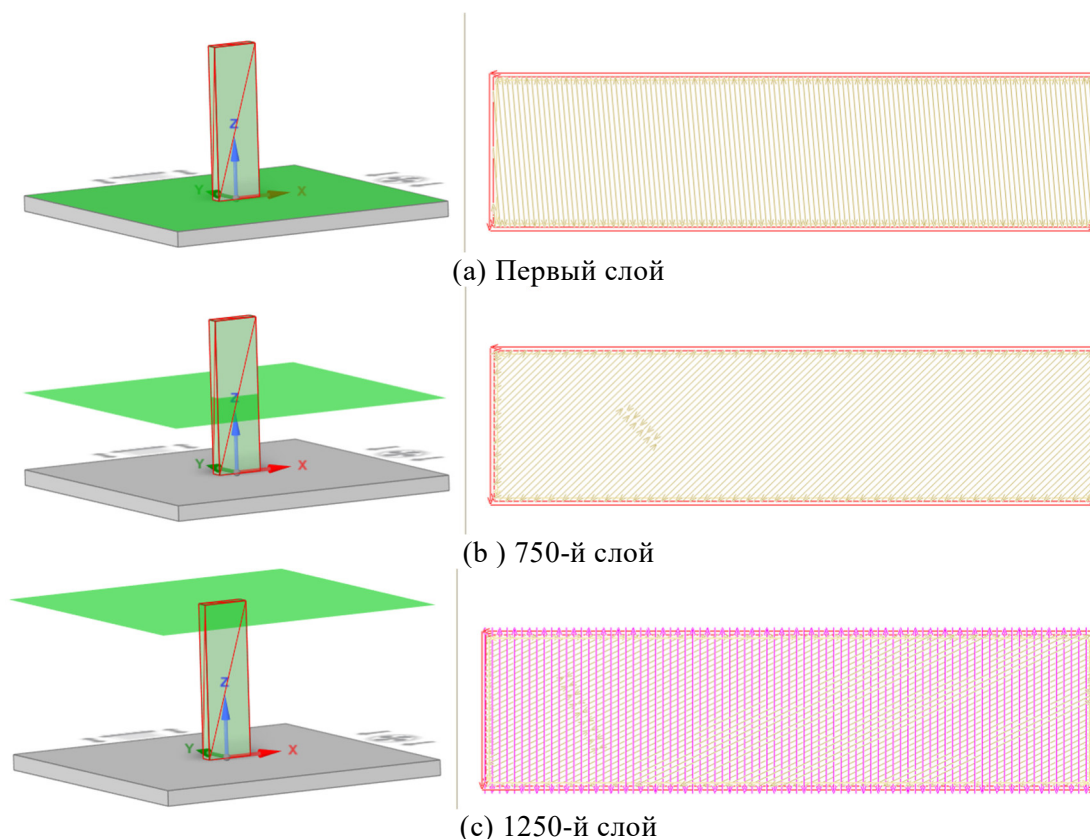


Рис 4. Схема послойного построения модели в процессе SLM-печати, 4(a) Первый слой, 4(b) 750-й слой, 4(c) 1250-й слой

4. Комплексное влияние геометрических параметров тонкостенных деталей на деформацию

Были созданы три группы моделей, в которых последовательно увеличивались толщина, длина и высота, каждая группа содержала восемь тонкостенных деталей, как показано в таблице 4.

Таблица 4

Таблица переменных параметров тонкостенных деталей

Группа	Параметр	Последовательность значений (мм)	Фиксированные параметры (мм)
Первая группа	Толщина	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	Длина: 15mm Высота: 50mm
Вторая группа	Длина	50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85	Длина: 15mm Толщина: 0.5mm
Третья группа	Высота	15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	Толщина: 0.5mm Высота: 50mm

4.1. Влияние геометрических параметров на общую деформацию

Как показано на рисунке 5, изменение толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывает значительное влияние на величину и характер общей деформации, однако степень и механизм этого влияния различаются. Увеличение толщины приводит к росту отклонения от плоскостности и увеличению углового прогиба по концам детали, что сопровождается локальным сжатием боковых поверхностей. При этом минимальные значения деформации наблюдаются в области опорной поверхности благодаря жесткому закреплению основания.

Рост высоты детали приводит к увеличению протяженности зоны максимальных отклонений вдоль вертикальной оси, а также к усилению прогиба в угловых зонах конструкции. Зависимость деформации от высоты носит линейный характер. Увеличение длины детали вызывает перераспределение поперечных деформаций: зона с минимальными отклонениями расширяется в центральной части, а зоны максимальных прогибов смещаются к концам конструкции, формируя непрерывную область повышенных отклонений от расчетной геометрии. В целом, толщина является определяющей

щим фактором, влияющим на формообразование и жесткость детали, за ней следуют высота и длина.

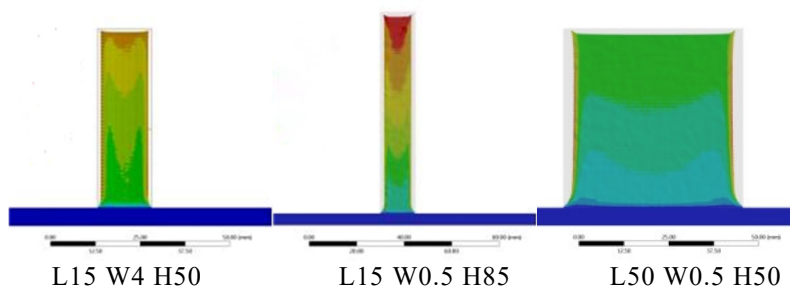


Рис. 5. Моделирование общей деформации детали при различных геометрических параметрах

4.2. Влияние геометрических параметров на деформацию по X

Как показано на рисунке 6, изменения толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывают значительное влияние на деформацию в направлении X, однако степень и характер воздействия различаются. Увеличение толщины приводит к значительному росту деформации в направлении X: максимальное отклонение составляет 2,8 % от длины нижней стороны (0,42 мм), доля вклада в общую деформацию достигает 162,6 %, а скорость роста деформации – 6,31 % на 1 мм толщины. Этот эффект сопровождается усилением выпячивания угловой зоны и уменьшением толщины боковых стенок. Изменение высоты оказывает менее выраженное влияние на деформацию в направлении X: максимальное отклонение составляет 2,64 % от длины нижней стороны

(0,396 мм), вклад в общую деформацию – 177,21 %, а скорость роста деформации – всего 0,13 % на каждые 10 мм высоты. При этом деформационный режим остается стабильным, отмечается лишь незначительное усиление сужения в средней части детали. Увеличение длины значительно усиливает деформацию в направлении X: максимальная деформация достигает 4,18 % от длины нижней стороны (0,628 мм), вклад в общую деформацию – 184,14 %, скорость роста деформации составляет 58,41 % на каждые 10 мм длины. Это выражается в усилении выпячивания угловой зоны и расширении области сужения боковых стенок. В целом, толщина является основным фактором, влияющим на деформацию в направлении X, за ней следует длина, а высота оказывает наименьшее влияние.

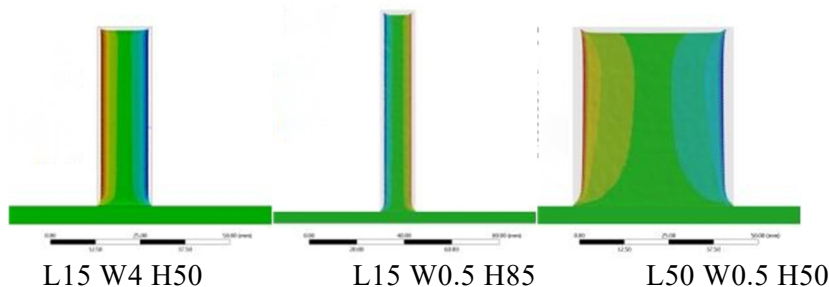


Рис 6. Моделирование деформации детали в направлении X при различных геометрических параметрах

4.3. Влияние геометрических параметров на деформацию по Y

Как показано на рисунке 7, изменения толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывают заметное влияние на деформацию в направлении Y, однако степень и характер воздействия различаются. Увеличение толщины приводит к значительному росту деформации вдоль оси Y: максимальное отклонение достигает 0,563 % от высоты детали (0,281 мм), доля вклада в общую деформацию составляет 108,9 %, а скорость роста деформации – 316,42 % на каждый миллиметр толщины. Этот эффект сопровождается усилением сжатия

верхней части конструкции и втягиванием боковых стенок. Изменение высоты оказывает менее выраженное влияние на деформацию в направлении Y: максимальное отклонение составляет 13,43 % от толщины детали (0,067 мм), вклад в общую деформацию достигает 30 %, а скорость роста деформации – 14,63 % на каждые 10 мм высоты. При этом деформационный режим сохраняет стабильность, фиксируется лишь усиление боковых колебаний по мере увеличения высоты. Увеличение длины также оказывает ограниченное влияние на деформацию вдоль оси Y: максимальная деформация составляет 12,2 % от толщины детали

(0,061 мм), вклад в общую деформацию – 17,9 %, скорость роста деформации достигает 15,19 % на каждые 10 мм длины. В этом случае наблюдается сжатие верхней части конструк-

ции и формирование неровных волн на боковых стенках. В целом, толщина является основным фактором, влияние высоты и длины сравнительно слабое.

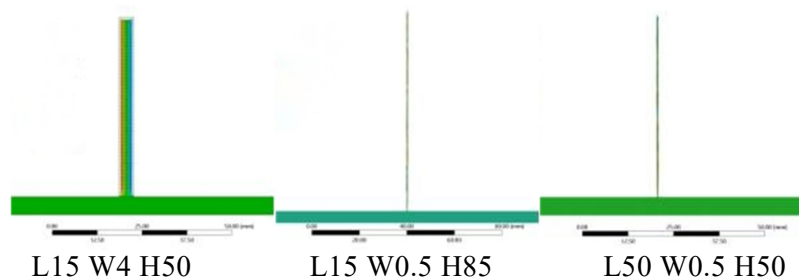


Рис. 7. Моделирование деформации детали в направлении Y при различных геометрических параметрах

4.4. Влияние геометрических параметров на деформацию по Z

Как показано на рисунке 8, изменения толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывают заметное влияние на деформацию в направлении Z, однако степень и механизм воздействия различаются. Увеличение толщины значительно усиливает деформацию вдоль оси Z: максимальное отклонение достигает 7,9553 % от толщины детали (0,318 мм), доля вклада в общую деформацию составляет 123,1 %, а скорость роста деформации – 134,61 % на каждый миллиметр толщины. Этот эффект сопровождается сжатием верхней части конструкции и сокращением зоны максимальных деформаций, визуально отображаемой глубоким синим цветом в верхней области детали. Изменение высоты приводит к расширению зоны деформации в направлении Z: синие и глубокосиние участки смещаются вниз, что сопровождается усилением наружного выпячивания верхнего угла конструкции. Максимальное

отклонение составляет 1,89 % от длины нижней стороны (0,283 мм), вклад в общую деформацию достигает 126,43 %, а скорость роста деформации составляет 20,06 % на каждые 10 мм высоты. Увеличение длины также усиливает деформацию вдоль оси Z, распространяя зону деформации по горизонтали: глубокосиние участки в верхней средней части опускаются вниз, при этом сохраняется выраженное наружное выпячивание угловой зоны. Максимальное отклонение достигает 2,27 % от толщины детали (0,341 мм), вклад в общую деформацию составляет 100 %, а скорость роста деформации – 44,69 % на каждые 10 мм длины. В целом, толщина является основным фактором, определяющим деформацию вдоль оси Z, за ней следуют высота и длина, влияние которых менее выражено. При этом все три параметра демонстрируют тенденцию к увеличению деформации с ростом их значений.

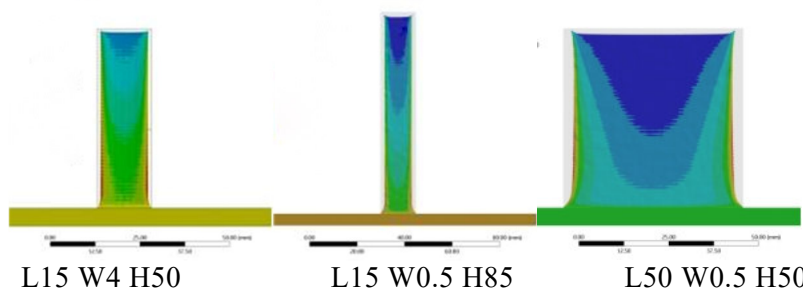


Рис 8. Моделирование деформации детали в направлении Z при различных геометрических параметрах

5. Экспериментальная проверка

На основе оборудования для аддитивного производства Nanbang HBD-150SLM были проведены печатные эксперименты с использованием параметров и материалов, указанных в таблице 1. Печатные образцы имели размеры L15 W1 H50 и L15 W4 H50, как показано на рисунке 9. Для измерения геометрических параметров и оценки деформаций использовался высокоточный цифровой штангенциркуль

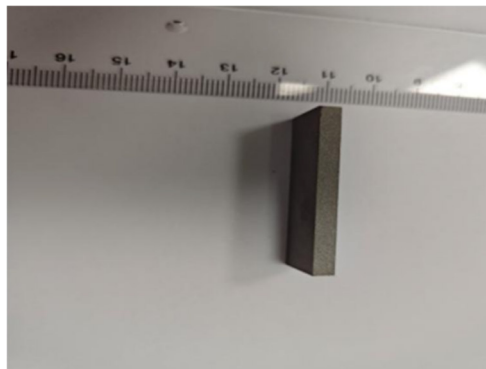
Mitutoyo серии Absolute с точностью $\pm 0,01$ мм и диапазоном 0–150 мм. Этот инструмент позволяет проводить измерения линейных размеров с высокой повторяемостью и минимальной погрешностью, что необходимо для точной оценки отклонений, вызванных деформацией. Методика оценки деформации заключалась в сравнении измеренных линейных размеров образцов после печати с их номинальными значе-

ниями, а также с результатами численного моделирования. Для каждого образца проводились замеры в направлениях X и Z по нескольким контрольным точкам, после чего вычислялись абсолютные отклонения и процентные значения деформаций относительно исходных размеров. Измерения образца L15 W1 H50 показали деформацию в направлении X в размере 0,39 мм, что составляет примерно 2,6 % от длины нижней стороны (15 мм), а в направлении Z – 0,25 мм, что составляет 0,5 % от высоты детали (50 мм). Для сравнения, результаты моделирования показали деформации в 0,394 мм (2,63 %) в направлении X и 0,251 мм

(0,5 %) в направлении Z, что свидетельствует о высокой точности прогноза. Аналогично, для образца L15 W4 H50 деформация в направлении X составила 0,42 мм (2,8 % от длины нижней стороны), а в направлении Z – 0,27 мм (0,54 % от высоты), в то время как модель предсказала деформации 0,42 мм (2,8 %) и 0,31 мм (0,62 %) соответственно, что также подтверждает достоверность численного моделирования. Вышеуказанные экспериментальные результаты подтверждают, что предсказания деформации в данной статье являются достаточно точными.



(а) L15 W1 H50



(б) L15 W4 H50

Рис. 9. Изображение экспериментального образца L15 W1 H50 и (б) Изображение экспериментального образца L15 W4 H50

6. Заключение

Толщина является основным фактором, влияющим на деформацию тонкостенных конструкций. С увеличением толщины наблюдается существенный рост как общей деформации, так и деформаций по отдельным направлениям. Деформация преимущественно концентрируется в верхней части конструкции и проявляется в виде выпуклости углов и сжатия боковых стенок. Толщина оказывает наибольшее влияние на деформацию по направлению X, а также существенно влияет на деформации по направлениям Y и Z. При этом общая деформация имеет тенденцию к увеличению с ростом толщины.

Высота конструкции в основном влияет на продольное расширение зоны деформации. При увеличении высоты зона деформации распространяется вниз, область максимальных деформаций в верхней части увеличивается, однако влияние высоты на деформацию по направлению X остаётся незначительным, а влияние на деформации по направлениям Y и Z относительно слабое. Увеличение высоты приводит к линейному росту общей деформации и усиливает волнообразные искажения боковых стенок.

Длина конструкции преимущественно влияет на поперечное расширение зоны деформации. С увеличением длины центральная и нижняя часть зоны низкой деформации расширяется в поперечном направлении, усиливается выпуклость верхних углов. При этом деформация по направлению X существенно возрастает, тогда как влияние на деформацию по направлению Y остаётся незначительным. Увеличение длины приводит к стабильному росту общей деформации и расширению зоны деформаций в поперечном направлении.

В целом влияние высоты и длины на деформацию относительно слабее, чем влияние толщины, которая является ключевым фактором, определяющим поведение тонкостенных конструкций при деформации. Однако, как показывает фундаментальная механика твёрдого тела, увеличение толщины, как правило, приводит к росту общей жёсткости конструкции и, соответственно, к снижению её упругих деформаций.

Тем не менее, в производственных процессах, связанных с интенсивным тепловложением, таких как селективное лазерное плавление (SLM), фактическая деформация конструкции зависит не только от её геометрических параметров, но и в значительной степени опреде-

ляется термическими градиентами и остаточными термическими напряжениями. В частности, увеличение толщины действительно повышает жёсткость конструкции, но одновременно приводит к усилению температурных градиентов между внутренними и наружными слоями, что вызывает неравномерное тепловое расширение и образование более высоких остаточных напряжений. Этот эффект особенно выражен в верхней части тонкостенных конструкций, а также в зонах кромок и углов, где наблюдается концентрация термических напряжений. В результате возможно возникновение таких дефектов, как коробление, деформация кромок или выпучивание углов конструкции.

Таким образом, при проектировании и оптимизации технологии производства необходимо комплексно учитывать двойственный эффект изменения толщины — влияние как на жёсткость конструкции, так и на распределение тепловых напряжений. Только сбалансированный подход к выбору геометрических параметров позволит минимизировать общие деформации и обеспечить высокоточную печать тонкостенных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gao B., Zhao H., Peng L., Sun Z. A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM) // *Micromachines*. 2023. Vol. 14 (1). 57. DOI: 10.3390/mi14010057.
2. Nayeem A.M., Hossain M.M.N. Usage of Additive Manufacturing in the Automotive Industry: A Review. Bangladesh // *Journal of Multidisciplinary Scientific Research*. 2023. Vol. 8(1). Pp. 9–20. DOI: 10.46281/bjmsr.v8i1.2135.
3. La Fé-Perdomo I., Ramos-Grez J. A., Beruvides G., Mujica R. A. Selective Laser Melting: Lessons from the Medical Devices Industry and Other Applications // *Rapid Prototyping Journal*. 2021. Vol. 27(10). Pp. 1801–1830.
4. Liu Y., Yang Y., Wang D. A Study on the Residual Stress during Selective Laser Melting (SLM) of Metallic Powder // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. Pp. 647–656. DOI: 10.1007/s00170-016-8466-y.
5. Chen C., Zhu H., Xiao Z., Liu S., Yin J., Zeng X. The Residual Stress Distribution of Ti-6Al-4V Thin Wall in the Selective Laser Melting // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 538(1). 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/538/1/012020.
6. Chen S., Liu J., Wang W., Zhang J., Niu K. Research Progress on Laser Powder Bed Fusion of Thin-Walled Parts // *Precision Forming Engineering*. 2020. Vol. 12(5). Pp. 122–131.
7. Clijsters S, Craeghs T, Moesen M. Optimization of thin wall structures in SLM // *Direct Digital Manufacturing Conference*. Date: 2012/03/14–2012/03/15. Location: Berlin. 2012.
8. Abele E., Stoffregen H. A., Kniepkamp M., Lang S., Hampe M. Selective Laser Melting for Manufacturing of Thin-Walled Porous Elements // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 215. Pp. 114–122.
9. Li Z., Xu R., Zhang Z., Kucukkoc I. The Influence of Scan Length on Fabricating Thin-Walled Components in Selective Laser Melting // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 126. Pp. 1–12.
10. Huang W., Zhang Y. Finite Element Simulation of Thermal Behavior in Single-Track Multiple-Layers Thin Wall without-Support during Selective Laser Melting // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 42. Pp. 139–148.
11. Luo Z., Liu M., Chen R., Dan P., Guo N. Simulation and Experimental Study of Deformation Control of Large-Size and Thin-Wall Parts by SLM // *China Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 35(9). 1653.
12. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., Tan H., Lin X., Wang S. Warpage Analysis and Control of Thin-Walled Structures Manufactured by Laser Powder Bed Fusion // *Metals*. 2021. Vol. 11(5). 686. DOI: 10.3390/met11050686.
13. Wu T., Li C., Sun F., Liu P.F., Xia H.B. Reduction in Residual Stress and Distortion of Thin-Walled Inconel 718 Specimens Fabricated by Selective Laser Melting: Experiment and Numerical Simulation // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2024. Vol. 212. Part A, 105292. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2024.105292.
14. Lin K., Yuan L., Gu D. Influence of Laser Parameters and Complex Structural Features on the Bio-Inspired Complex Thin-Wall Structures Fabricated by Selective Laser Melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 267. Pp. 34–43. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.12.004.
15. Linda K. E., Jie Y., Haihong Z., Gangyong P., Jingli S., Changpeng C., Guoqing W., Zhongquan L., Xiaoyan Z. Numerical Simulation of Stress Evolution of Thin-Wall Titanium Parts Fabricated by Selective Laser Melting // *Acta Metallurgica Sinica*. 2020. Vol. 56(3). Pp. 374–384. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.0019.
16. Ming-san X., Yao-feng L., Yao-wu Y. Size Deviation Prediction and Control of Thin-walled Parts Formed by SLM [J] // *Journal of Net-shape Forming Engineering*. 2023. Vol. 15(2). Pp. 86–94. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.02.011

Информация об авторах

Чжоу Минсяо, аспирант, кафедры машинностроительные и технологии.
E-mail: zhoumingxiao86@gmail.com. Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Россия

Поступила 08.04.2025 г.

© Минсяо Ч., 2025

Zhou Mingxiao

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

E-mail: zhoumingxiao86@gmail.com

THE INFLUENCE OF GEOMETRY ON THE DEFORMATION OF THIN-WALLED PARTS IN SLM

Abstract. This study is aimed at a comprehensive investigation of the patterns governing the influence of geometric dimensions of thin-walled components on their deformation during the process of selective laser melting (SLM) in the additive manufacturing of metal products. Particular attention is given to key variables such as the length, width, and height of the parts. Based on these parameters, three separate groups of models were constructed, each comprising eight different specimens with progressively increasing geometric dimensions to enable a more precise analysis of the relationship between deformation and component size. For each group of models, a detailed numerical simulation of the 3D printing process was carried out using the specialized ANSYS Additive LPBF module, which makes it possible to account for thermal and mechanical effects during the part-building process. During the virtual experiment, data on stresses and deformations along the X, Y, and Z axes were collected, and the overall deformation values were also determined. Based on the simulation results, a real-world printing experiment was conducted with the same models to verify the accuracy of the calculations. Actual measurements of the deformations of the printed parts, obtained under various combinations of parameter values, enabled a direct comparison with the simulation data. The analysis demonstrated a high degree of agreement between the experimental and simulation results, confirming the accuracy of the applied numerical modeling method and its suitability for predicting deformations in the SLM process of manufacturing complex thin-walled components.

Keywords: additive manufacturing, selective laser melting (SLM), thin-walled parts, deformation analysis, finite element method (FEM).

REFERENCES

1. Gao B., Zhao H., Peng L., Sun Z. A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM). *Micromachines*. 2023. Vol.14(1). P. 57. DOI: 10.3390/mi14010057.
2. Nayeem A.M., Hossain M.M.N. Usage of Additive Manufacturing in the Automotive Industry: A Review. *Bangladesh. Journal of Multidisciplinary Scientific Research*. 2023. Vol.8(1). Pp. 9-20. DOI: 10.46281/bjmsr.v8i1.2135.
3. La Fé-Perdomo I., Ramos-Grez J. A., Beruvides G., Mujica R. A. Selective Laser Melting: Lessons from the Medical Devices Industry and Other Applications. *Rapid Prototyping Journal*. 2021. Vol. 27(10). Pp. 1801–1830.
4. Liu Y., Yang Y., Wang D. A Study on the Residual Stress during Selective Laser Melting (SLM) of Metallic Powder. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol.87. Pp. 647–656. DOI: 10.1007/s00170-016-8466-y.
5. Chen C., Zhu H., Xiao Z., Liu S., Yin J., Zeng X. The Residual Stress Distribution of Ti-6Al-4V Thin Wall in the Selective Laser Melting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 538(1). 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/538/1/012020.
6. Chen S., Liu J., Wang W., Zhang J., Niu K. Research Progress on Laser Powder Bed Fusion of Thin-Walled Parts. *Precision Forming Engineering*. 2020. Vol.12(5). Pp. 122–131.
7. Clijsters S, Craeghs T, Moesen M. Optimization of thin wall structures in SLM. *Direct Digital Manufacturing Conference*. Date: 2012/03/14-2012/03/15. Location: Berlin. 2012.
8. Abele E., Stoffregen H. A., Kniepkamp M., Lang S., Hampe M. Selective Laser Melting for Manufacturing of Thin-Walled Porous Elements. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol.215. Pp.114–122.
9. Li Z., Xu R., Zhang Z., Kucukkoc I. The Influence of Scan Length on Fabricating Thin-Walled Components in Selective Laser Melting.

International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2018. Vol. 126. Pp.1–12.

10. Huang W., Zhang Y. Finite Element Simulation of Thermal Behavior in Single-Track Multiple-Layers Thin Wall without-Support during Selective Laser Melting. Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 42. Pp.139–148.

11. Luo Z., Liu M., Chen R., Dan P., Guo N. Simulation and Experimental Study of Deformation Control of Large-Size and Thin-Wall Parts by SLM. China Mechanical Engineering. 2024. Vol. 35(9). 1653.

12. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., Tan H., Lin X., Wang S. Warpage Analysis and Control of Thin-Walled Structures Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. Metals. 2021. Vol. 11(5). Pp. 686. DOI: 10.3390/met11050686.

13. Wu T., Li C., Sun F., Liu P. F., Xia H. B. Reduction in Residual Stress and Distortion of Thin-Walled Inconel 718 Specimens Fabricated by Selective Laser Melting: Experiment and Numerical Simulation. International Journal of Pressure

Vessels and Piping. 2024. Vol.212. Part A, 105292 DOI: 10.1016/j.ijpvp.2024.105292.

14. Lin K., Yuan L., Gu D. Influence of Laser Parameters and Complex Structural Features on the Bio-Inspired Complex Thin-Wall Structures Fabricated by Selective Laser Melting. Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 267. Pp. 34–43. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.12.004.

15. Linda K.E., Jie Y., Haihong Z., Gangyong P., Jingli S., Changpeng C., Guoqing W., Zhongquan L., Xiaoyan Z. Numerical Simulation of Stress Evolution of Thin-Wall Titanium Parts Fabricated by Selective Laser Melting. Acta Metallurgica Sinica. 2020. Vol. 56(3). Pp.374–384. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.0019.

16. Ming-san X., Yao-feng L., Yao-wu Y., Size Deviation Prediction and Control of Thin-walled Parts Formed by SLM[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering. 2023. Vol. 15(2). Pp. 86–94. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.02.011

Information about the authors

Zhou Mingxiao. E-mail: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, 117198, Russia

Received 08.04.2025

Для цитирования:

Минсяо Ч. Влияние геометрии на деформацию тонкостенных деталей при SLM // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 139–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-139-149

For citation:

Mingxiao Z. The influence of geometry on the deformation of thin-walled parts in SLM. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 139–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-139-149