



УДК 621.762

И. В. Горбатов, Ю. А. Орлов, В. А. Антюфеев,
Т. В. Тельгерекова, Н. Ю. Орлова

Определение геометрической точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения, получаемых в зависимости от расположения в рабочем пространстве принтера по технологии селективного лазерного плавления из стали марки 12X18H10T

Внедрение аддитивных технологий для изготовления деталей позволит значительно повысить эффективность и мобильность производства. Наибольшей точностью при изготовлении деталей из металлов и сплавов обладает технология селективного лазерного плавления. Имеется ряд публикаций о физико-механических свойствах таких изделий, которые часто превышают свойства материалов, получаемых по традиционной технологии, но нет данных о геометрической точности изготовления. В статье приведены конкретные данные по геометрической точности, зависимости от различных факторов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, SLM-технология, CAD-модель, 3D-модель, STL-формат.

Успешность современных производств определяется их способностью максимально быстро реагировать на меняющиеся запросы потребителей. Это становится возможным при глубоком внедрении цифровых технологий в процессы проектирования и производство. При проектировании компьютерные технологии достаточно широко используются. В процессе изготовления также применяются принципиально новые технологии послойного синтеза, или аддитивные технологии (*Additive Manufacturing*), которые позволяют в кратчайшие сроки изготовить модель, прототип или даже функциональную деталь. Наибольшее практическое применение в настоящее время получили:

- *SLA*-технология (*StereoLithography*) – стереолитография, исходный материал – фотополимер;

- *FDM*-технология (*Fused Deposition Modelig*) – моделирование методом послойного наплавления, исходный материал – термопластичный полимер;

- *SLS*-технология (*Selective Laser Sintering*) – выборочное лазерное спекание, исходный материал – порошкообразный, в большинстве случаев полимер сложного состава;

- *SLM*-технология (*Selective Laser Melting*) – выборочное лазерное плавление, исходный материал – металлический порошок.

Активно используя различные технологии объемной (3D) печати в производственном процессе как на стадии проектирования, так и на стадии изготовления деталей, можно существенно сократить время на разработку новых изделий, подготовку производства и изготовление, а также уменьшить трудоемкость изготовления и расход материалов. Большинство аддитивных технологий (технология *SLA*, *SLS*, *FDM*) применяются для изготовления моделей и прототипов, чтобы определить собираемость и эксплуатационные показатели, а также для ускорения и упрощения вспомогательных технологических процессов производства (мастер-модели, формы для литья, пресс-формы). Более редко, но все же используются аддитивные технологии для производства слабо нагруженных деталей не очень ответственного назначения (декоративные накладки, защитные кожухи и т. д.). *SLM*-технология позволяет создавать не только прототипы [1], но и готовые изделия из металлов и сплавов с высоким комплексом механических свойств. Как показали исследования, в том числе проведенные в Снежинском физико-техническом институте (СФТИ НИЯУ МИФИ) совместно с РФЯЦ-ВНИИТФ, химический состав металлических порошков, используемых для печати, может быть различным. Переход на печать другим материалом, который наиболее интересен для данного производителя, можно осуществить достаточно быстро. Разработка режимов печати новых материалов проводится аналитически с последующим анали-



зом структуры и физико-механических свойств изготовленных образцов. В настоящее время отработаны режимы печати металлическими порошками нержавеющей стали и жаропрочного никелевого сплава, соответствующими по химическим составам российским стандартам. Свойства получаемых изделий соответствуют физико-механическим свойствам материалов, получаемых по традиционным технологиям, а в ряде случаев значительно превышают эти свойства (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение действительных размеров цилиндров

Параметры	Пробная печать	Уточненная печать
Средний диаметр, мм	9,977	10,0015
Интервал действительных размеров цилиндров вне зависимости от расположения, мкм	109,0	58,0
Доверительный интервал ($P = 0,95$), мкм	80,0	40,0

В ядерно-оружейном комплексе, авиа- и ракетостроении существует ряд особенностей при выборе материала, из которого производят изделие, в частности, на первый план выходят эксплуатационные (физико-механические) свойства материалов, в то время как их технологические свойства (обрабатываемость) не являются лимитирующим фактором. В связи с этим изготовление изделий с использованием традиционных технологий зачастую связано с большими материальными и временными затратами. Поэтому данные производства нельзя отнести к высокоэффективным. Значительно повысить эффективность можно путем внедрения аддитивных технологий в производственный процесс. В целом ситуация с внедрением аддитивных технологий в российскую промышленность остается недостаточно благополучной. Одним из факторов, который тормозит внедрение аддитивных технологий, является неопределенность в показателях точности изготавливаемых деталей. В данной статье, в частности, остановимся на вопросах геометрической точности и показателях качества поверхности деталей, получаемых по технологии

селективного лазерного плавления (*SLM*), как наиболее перспективного для изготовления функциональных деталей ответственного назначения.

Анализ показал, что основные вопросы, на которые необходимо ответить для широкого внедрения *SLM*-технологии в производственный процесс, следующие: какова максимально высокая геометрическая точность изготовления и какова микрогеометрия поверхности?

Таким образом, с прикладной точки зрения необходимо ответить на вопросы:

- возможно ли изготавливать изделия достаточной точности и качества поверхности, чтобы не использовать дополнительную обработку;
- какова стабильность/повторяемость размеров изготавливаемых деталей;
- влияет ли форма поверхности изготавливаемых деталей на их отклонение от номинальных размеров 3D-модели;
- возможна ли последующая обработка изделий, полученных с использованием *SLM*-технологии;
- какие методы постобработки можно использовать и какие будут наиболее эффективными;
- если необходима постобработка, то какой минимальный припуск необходимо оставлять;
- какова себестоимость постобработки;
- выгодно ли использовать 3D-печать, если будет применяться постобработка?

Исходным вопросом является определение точности и стабильности/повторяемости геометрических размеров 3D-печати.

При определении точности геометрии необходимо выявить наибольшую теоретическую геометрическую точность. Она следует из физической сущности процесса.

По своей физической сущности *SLM*-технология относится к *Bed Deposition*, т. е. первоначально формируется слой (*bed*), в котором выборочно идет отверждение (плавление) металлического порошка. Слой формируется за счет движения рабочего стола (платформы построения) в вертикальном направлении (ось *z*) и последующем распределении порошка материала построения по платформе. В этом



процессе имеются два лимитирующих фактора: величина единичного шага 3D-принтера (технические характеристики оборудования) и размер фракции материала построения.

Обзор технических характеристик 3D-принтеров показал, что минимальный шаг построения 20 мкм.

Каждый производитель 3D-принтеров дает свои рекомендации по фракционному составу порошков, используемых для печати: *Phenix (3D Systems)* – порошок с размерами частиц $d_{50} = 10$ мкм [1], *Concept Laser* – дисперсность порошка $d_{50} = 26,9$ мкм (25...52 мкм), *SLM Solutions* – $d_{50} = 10...30$ мкм, *Arcam* – размер частиц 45...100 мкм. Числовое значение показателя d_{50} означает, что 50 % частиц порошка должно быть не более указанного числового значения (если $d_{50} = 40$ мкм, то это означает, что у 50 % частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм), соответственно остальные частицы могут быть больше указанного числового значения d_{50} . Как видно из приведенных данных по различным 3D-принтерам, в большинстве случаев частицы используемого порошка превышают размер 20 мкм, следовательно, такую величину слоя *bed* с достаточно плотной упаковкой частиц расходуемого порошка технически сформировать невозможно. Исходя из вышесказанного и на основе рекомендаций от производителей 3D-принтеров, толщина слоя *bed* обычно устанавливается начиная с 40 мкм с возможностью его увеличения (пошагово) на 20 мкм. На основе этого все криволинейные поверхности смогут повторять форму 3D-модели только в виде ступенек (рис. 1). Причем высота ступеньки будет не менее толщины единичного слоя.

Следующий лимитирующий фактор определяется самим процессом плавления (рис. 2).

В процессе формирования изделия происходит расплавление металла слоя *bed* под воздействием луча лазера. Размер единичной ванны расплава будет зависеть от фокусировки луча лазера, теплопроводности металла, плотности расположения частиц в слое *bed*, поверхностного натяжения, которое образуется на поверхности расплава и т. д. Это многофакторный процесс, но можно отметить, что единич-

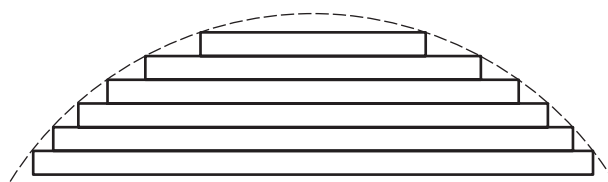


Рис. 1. Форма криволинейных поверхностей

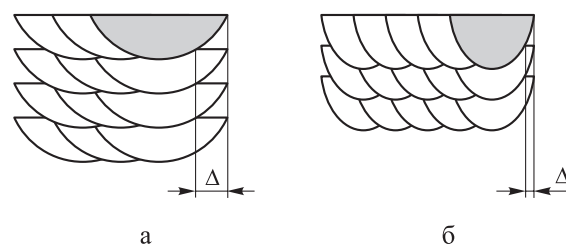


Рис. 2. Схемы процесса плавления по SLM-технологии: а – единичная ванна при малой степени фокусировки луча лазера; б – единичная ванна при высокой степени фокусировки луча лазера [2]

ная ванна всегда больше пятна воздействия лазера на слой *bed*. Величина пятна воздействия лазера (степень фокусировки) определяется на стадии создания управляющей программы, обычно варьируется в пределах 40...80 мкм. В связи с тем что единичная ванна расплава имеет определенную (близкую к полукругу) форму (см. рис. 2), на поверхности будут появляться неровности, величина которых зависит от степени фокусировки луча и теплопроводности слоя *bed*. Кроме того, в крайних единичных ваннах могут оставаться частично расплавленные («приплавленные») частицы, что искажает микрогеометрию поверхности и изменяет геометрические размеры получаемых изделий. Степень приплавления частиц в крайних слоях может быть разнообразной, а следовательно, и прочность их удерживания поверхностью будет разной. Частицы с минимальной величиной приплавления (размер частицы обычно от 18...80 мкм) могут значительно влиять на шероховатость поверхности и на геометрический размер, но их легко удалить. Если степень приплавления частицы более или около 50 %, то для ее удаления необходимы усилия, близкие по величине к прочности самого материала, но влияние на изменение размера изделия значительно меньше, чем в предыдущем случае. Из вышесказанного следует, что микрогеометрия поверхности

изделий, получаемых по *SLM*-технологии, будет определяться размером единичной ванны (т. е. пятном воздействия лазера) и величиной частиц исходного металлического порошка. Если исходить из предположения, что размер частиц исходного порошка 25...45 мкм и единичная ванна 40 мкм, то шероховатость поверхности должна быть около $R_z = 20$.

Таким образом, анализ физической сущности процесса селективного лазерного плавления показал, что чем меньше шаг построения и мельче размер частиц исходного материала, тем выше точность и меньше шероховатость поверхности. Нижний размер частиц, используемых в *SLM*-технологии, ограничен исходя из технологических особенностей процесса [3]. В частности, размер частиц должен обеспечить достаточную сыпучесть для создания слоя *bed*, но необходимо, чтобы он не сдувался потоками газа из рабочей области. Из этого следует, что минимальный размер частиц будет зависеть от удельной плотности самого исходного сплава.

Для получения конкретных данных по точности был проведен ряд экспериментов. На основании ранее полученного опыта по изготовлению образцов и деталей по *SLM*-технологии было выявлено, что на точность получаемых размеров и микрогеометрию поверхности, кроме фракционного состава исходного порошка, могут влиять расположение образцов при печати в рабочем пространстве 3D-принтера, их форма и расположение относительно вертикали в рабочем пространстве при изготовлении. Для подтверждения (опровержения) этого были выбраны образцы простой формы:

- прямоугольный параллелепипед с размерами 10 × 10 × 30 мм;
- цилиндр с диаметром 10 мм, длиной 30 мм.

Для выявления возможного влияния расположения детали в зоне печати при составлении управляющих программ 3D-модели расположили вертикально и под углом 45° к горизонту.

Печать проводилась на 3D-принтере *Realizer SLM 100* по *SLM*-технологии. При печати были установлены следующие параметры: толщина слоя *bed* – 50 мкм, пятно лазера – 20 мкм. Фракция исходного порошка $d_{50} = 20$ мкм.

Полученные образцы были измерены с использованием универсальных средств бесконтактным методом: трехмерное сканирование (точность 0,005 мм) (рис. 3) и микрометр с точностью 0,001 мм (рис. 4). Измерения с использованием трехмерного сканирующего устройства были обработаны с применением специализированного программного обеспечения *Magic*. Данные измерения позволяют оценить отклонения от исходной модели по всей поверхности образца по очень большому

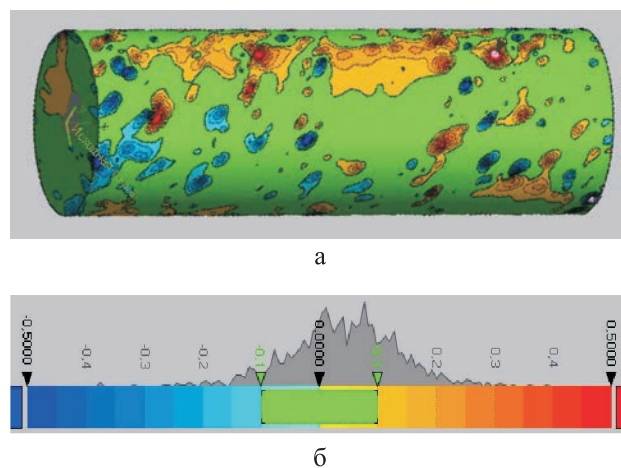


Рис. 3. Сканированные поверхности призмы в сравнении с исходной 3D-моделью (а) и распределение отклонений действительных размеров призмы от номинальных (б) (синий цвет – превышение действительного размера, красный – размер меньше допустимого, зеленый – размер находится в допуске)

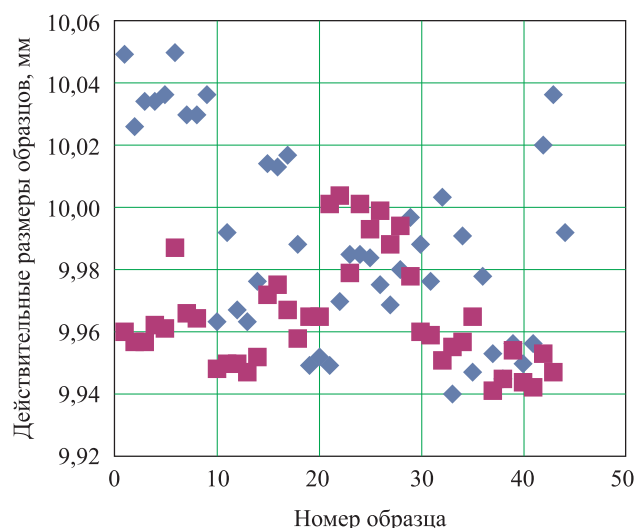


Рис. 4. Действительные диаметры цилиндров, измеренные с использованием микрометра:
♦ – вертикальное расположение; ■ – наклонное расположение



количеству точек. Единичный скан содержит до 1 млн точек. При сканировании образца использовалось 14 единичных сканов. Недостатком данного метода является более высокая погрешность измерения (0,005 мм), чем при измерении микрометром, поэтому в данном эксперименте сканирование используется как дополнительный (оценочный) вид контроля, который дает более полную оценочную картину отклонений действительной поверхности, но числовые значения имеют существенные отклонения, в том числе из-за бликования поверхности.

С целью надежного получения результата с использованием микрометра было проведено 8 серий измерительных экспериментов для каждого из образцов. Полученные результаты были обработаны с помощью методов статистического анализа [4, 5]. Результаты приведены на рис. 4. При вертикальном расположении цилиндров разброс действительных значений составил 100 мкм, при наклонном расположении – 70 мкм, что соответствует 10–11 квалитетам.

По результатам измерений обоими методами была выявлена закономерность: большая часть действительных размеров цилиндров несколько меньше номинального размера. Это объясняется особенностями подготовки управляющей программы для печати [6]. Управляющая программа для 3D-принтера составляется по 3D-модели, представленной в формате *STL* (триангулированная модель). При описании цилиндрической поверхности треугольниками появляется погрешность, связанная с этой неточностью (рис. 5).

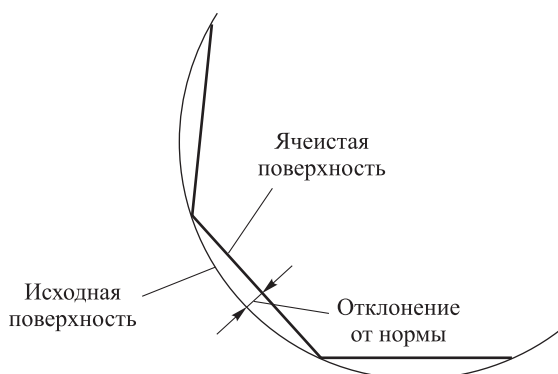


Рис. 5. Отклонение от исходной поверхности в *STL*-файле

Для уменьшения отклонений действительных размеров криволинейных поверхностей от номинала можно использовать два способа:

- повысить точность *STL*-модели путем уменьшения шага разбиения;
- провести пересчет и увеличить (уменьшить) номинальный размер 3D-модели, используемой для создания управляющих программ для 3D-принтера.

Первый способ можно использовать для достаточно простых изделий. Для изделий сложной пространственной формы при уменьшении шага модель может оказаться очень большой, и появятся дополнительные погрешности, связанные с проверкой 3D-модели на сплошность, а также повышаются требования к материально-аппаратному обеспечению.

Для реализации второго способа необходимо провести пробную печать, выявить отклонения, ввести поправочные коэффициенты на размеры 3D-модели. Преимуществом данного способа является то, что одновременно можно учесть влияние температурного коэффициента расширения и влияние расположения изготавливаемой детали в рабочем пространстве. На практике был реализован второй способ с частичным уменьшением шага разбиения. Действительные значения изготовленных цилиндров после введения поправочных коэффициентов приведены на рис. 6.

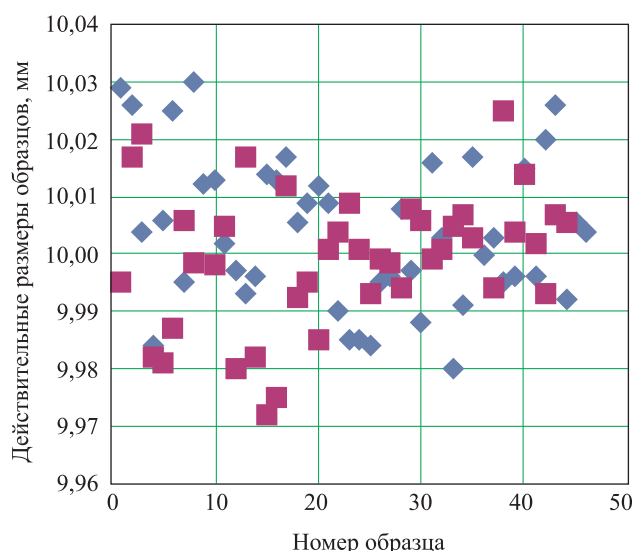


Рис. 6. Действительные диаметры цилиндров, изготовленные по *SLM*-технологии после введения поправочного коэффициента в 3D-модель (уточненная печать):
 ◆ – вертикальное расположение;
 ■ – наклонное расположение

После введения поправочных коэффициентов в 3D-модель (уточненная печать) при вертикальном расположении цилиндров разброс действительных значений составил 52 мкм, при наклонном расположении – 50 мкм, что не превышает допуска на 9 квалитет.

После введения поправочных коэффициентов разброс действительных значений цилиндров, вне зависимости от их расположения в рабочем пространстве 3D-принтера при изготовлении, составляет 58 мкм, что на 6 мкм превышает допуск по квалитету 9 (IT9 – 52 мкм), но значительно меньше допуска по квалитету 10 (IT10 – 84 мкм). Как показала обработка экспериментальных данных, большая часть (95 %) действительных размеров изготавливаемых образцов группируется вблизи номинального размера, разброс составляет 40 мкм. Дальнейшее повышение точности изготовления возможно, но будет осложняться из-за приплавления частиц, т. е. шероховатости поверхности. Повысить точность геометрических размеров можно путем использования минимальной постобработки, например пескоструйной обработки.

Результаты измерений действительных размеров призм пробной печати приведены на рис. 7, 8.

Анализ формы поверхности с использованием трехмерного сканирования вы-

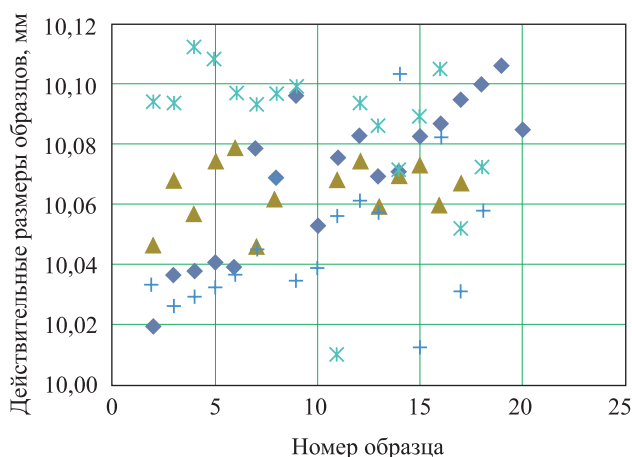
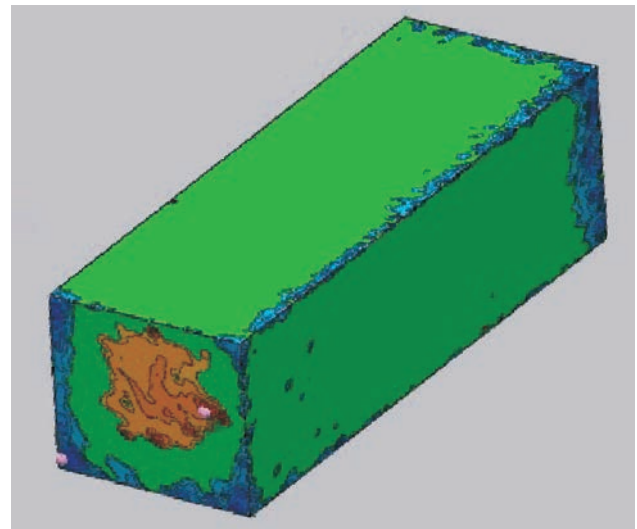


Рис. 7. Действительные размеры сторон призм из стали 12X18H10T по SLM-технологии. Измерения проводились с использованием микрометра, 8 серий:
 ◆ – первая сторона, вертикальное расположение; ▲ – первая сторона, наклонное расположение; * – вторая сторона, вертикальное расположение; + – вторая сторона, наклонное расположение



а



б

Рис. 8. Сравнение сканированной поверхности призмы (а) с исходной 3D-моделью (б) (синий цвет указывает на превышение действительных размеров)

явил приплавление частиц порошка на ребрах призмы, что дало значительное отклонение действительных размеров при измерении микрометром от номинальных. Была проведена пескоструйная постобработка, в результате чего действительные размеры граней призмы приблизились к номинальным (рис. 9, табл. 2).

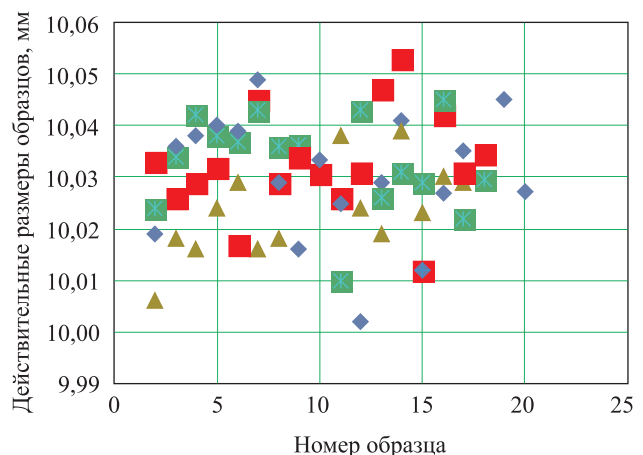


Рис. 9. Действительные размеры граней призм из стали 12X18H10T по SLM-технологии после введения поправочных коэффициентов в исходную 3D-модель перед созданием управляющей программы:
 ◆ – первая сторона, вертикальное расположение;
 ■ – первая сторона, наклонное расположение;
 ▲ – вторая сторона, вертикальное расположение;
 ■ – вторая сторона, наклонное расположение



Таблица 2

Сравнение действительных размеров сторон призм

Параметры	Пробная печать	После пескоструйной обработки
Средний размер грани, мм	10,067	10,018
Интервал действительных размеров вне зависимости от расположения, мкм	98,0	56,0
Доверительный интервал ($P = 0,95$), мкм	85,0	38,0

Как видно из результатов опыта, повторяемость выполнения размеров высокая.

Анализ действительных размеров изготовленных образцов выявил следующие особенности:

- образцы с вертикальным расположением (и цилиндрические, и призмы) имеют небольшую конусность на высоте 30 мм в пределах до 6 мкм;
- образцы, расположенные под углом 45° , при изготовлении не имеют конусности, разброс действительных размеров на 42 % меньше, чем у вертикальных.

Исследованию шероховатости поверхности были подвергнуты 40 образцов с различным расположением поверхностей относительно вертикали в рабочем пространстве 3D-принтера по *SLM*-технологии при печати. После проведения измерений было выявлено, что шероховатость поверхности зависит от ее положения в рабочем пространстве при печати и не зависит от формы. Наименьшая шероховатость получается на вертикальных поверхностях – $R_a = 1,6...2,5$. Чем больше поверхность отклоняется от вертикали, тем больше шероховатость. На горизонтальных поверхностях она может составлять до $R_z = 40...50$.

Таким образом, в результате анализа физической сущности процесса селективного лазерного плавления и проведения эксперимента по объемной печати нержавеющей стали 12X18H10T можно сделать следующие выводы:

- точность изготовления соответствует качеству 9–10;
- разброс действительных геометрических размеров меньше, если деталь при печати имеет небольшой угол к вертикали (до 43°);

- образцы, произведенные с использованием *SLM*-технологии, имеют высокую повторяемость размеров;
- форма изготавливаемой поверхности влияет на точность геометрических размеров;
- для повышения точности можно вводить поправочные коэффициенты в 3D-модель на стадии подготовки управляющей программы;
- поверхности, получаемые по *SLM*-технологии, могут быть подвергнуты пескоструйной обработке, что приводит к значительному снижению шероховатости поверхности и приближению действительных размеров к заданным;
- шероховатость изготавливаемых поверхностей зависит от расположения ее в рабочем пространстве при изготовлении, чем ближе поверхность к вертикали, тем меньше шероховатость, и наоборот.

Точность изготовления (кавалитет 9–10) может полностью соответствовать требованиям, предъявляемым к несопрягаемым поверхностям, т. е. такие поверхности могут изготавливаться по технологии селективного лазерного сплавления *SLM* без последующей механической обработки. Для поверхностей с более высокими требованиями по точности (кавалитет 6–7) и меньшей шероховатостью необходимо использовать последующую механическую обработку, поэтому новым этапом исследований должно являться определение глубины дефектного слоя при изготовлении деталей по технологии селективного лазерного плавления.

Список литературы

1. NASA 3-D Prints First Full-Scale Copper Rocket Engine Part. URL: <https://www.nasa.gov/marshall/news/nasa-3-d-prints-first-full-scale-copper-rocket-engine-part.html> (дата обращения 20.02.2019).
2. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
3. Шишковский И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2016. 400 с.
4. Потемкин А. В., Фридман М. Н., Эйсмонт И. М. Теория вероятностей и матема-



тическая статистика = Probability theory and mathematical statistics. М.: Финуниверситет, 2015. 100 с.

5. *Солонин И. С.* Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 216 с.

6. *Валетов В. А.* Аддитивные технологии (состояние и перспективы). СПб.: Университет ИТМО, 2015. 63 с.

Поступила 26.03.19

Горбатов Игорь Викторович – аспирант, старший преподаватель Снежинского физико-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Снежинск.

Область научных интересов: аддитивные технологии, обработка резанием на станках с числовым программным управлением.

Орлов Юрий Александрович – аспирант, старший преподаватель Снежинского физико-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Снежинск.

Область научных интересов: аддитивные технологии, материаловедение.

Антюфеев Владимир Александрович – аспирант Снежинского физико-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Снежинск.

Область научных интересов: аддитивные технологии, IT-технологии.

Тельгереева Татьяна Владимировна – аспирант Снежинского физико-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Снежинск.

Область научных интересов: аддитивные технологии, технологии механической обработки.

Орлова Наталия Юрьевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Технологии машиностроения» Снежинского физико-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Снежинск.

Область научных интересов: аддитивные технологии, материаловедение.



Determination of geometric accuracy and surface roughness of small parts of circular and square sections, obtained depending on the printer location in the working space using selective laser melting technology from steel grade 12KH18N10T

The introduction of additive technologies for the manufacture of parts will significantly improve the efficiency and mobility of production. The technology of selective laser melting has the greatest accuracy in the manufacture of metal and alloyed parts. There are a number of publications on the physical and mechanical properties of such products, which often exceed the properties of materials obtained by traditional technology, but there is no data on the geometric accuracy of manufacturing. This paper provides explicit data on geometric accuracy, depending on various factors.

Keywords: additive technologies, selective laser melting, SLM technology, CAD model, 3D model, STL format.

Gorbatov Igor Viktorovich – post-graduate student, Assistant Professor, Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk.
Science research interests: additive technologies, machining with numerically controlled machines.

Orlov Yuriy Aleksandrovich – post-graduate student, Assistant Professor, Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk.
Science research interests: additive technologies, materials science.

Antufeev Vladimir Aleksandrovich – post-graduate student, Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk.
Science research interests: additive technologies, IT-technologies.

Telgerekova Tatiana Vladimirovna – post-graduate student, Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk.
Science research interests: additive technologies, mechanical technologies.

Orlova Nataliya Yurievna – Candidate of Engineering Sciences, Head of Department of Mechanical Engineering Technologies, Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk.
Science research interests: additive technologies, materials science.