

24. Осокин, Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 421 с.
25. Косторнов, А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов / А. Г. Косторнов. – Киев : Наук. думка, 2002. – Т. 1. – 572 с.
26. Белик, В. В. Физическая и коллоидная химия / В. В. Белик, К. И. Киенская. – М. : Академия, 2015. – 288 с.
- 22 Ершов, Ю. А. Коллоидная химия. Физическая химия дисперсных систем / Ю. А. Ершов. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2014. – 352 с.

ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА 3D-ПЕЧАТИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

**А. Ф. Ильющенко¹, Т. А. Николайчук¹, А. И. Лецко¹,
О. О. Кузнечик¹, О. И. Карпович², А. Б. Антосяк¹,
В. Б. Ходер², А. Д. Савицкий², Н. М. Кибик²**

*¹Институт порошковой металлургии имени
академика О. В. Романа, г. Минск, Беларусь*

*²Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь, e-mail: pmi.timopheu@gmail.com*

Рассмотрена проблема определения качества изделий, получаемых современными методами 3D-печати: селективным лазерным сплавлением (далее – СЛС) металлических порошков, лазерной стереолитографии (далее – СЛ), а также послойной экструзии материала (далее – ПЭМ). Особое внимание уделено вопросам контроля и обеспечения стабильности аддитивных производственных процессов, включая такие факторы, как свойства исходных сырьевых материалов, условия их использования и изготовления из них изделий и их прототипов. На примере метода проведения атомно-силовой микроскопии (далее – АСМ) отражена возможность проведения контроля качества образцов на основе титанового сплава ВТ6.

Введение. Современное аддитивное производство в настоящее время переживает интенсивный рост своего развития и активного внедрения в различные отрасли народного хозяйства, начиная с машиностроения и заканчивая коммунальным хозяйством, включая бытовую сферу [1–6]. Особое место в этом производстве занимают аддитивные технологии, использующие для получения изделий различного назначения следующие методы:

селективная (избирательная) послойная экструзия материалов (ПЭМ), также известная, либо как модельное осаждение расплава (Fused Deposition Modeling или FDM), либо как формообразование расплавленной нитью (Fused Filament Fabrication или FFF);

селективная послойная лазерная фотополимеризация (ЛФП), также известная как аппарат лазерной стереолитографии (Stereolithography Apparatus или SLA);

селективное лазерное сплавление (СЛС) полимерных и металлических порошков, также известное, как Selective laser sintering (SLS), если это касается полимерных порошков, или Selective laser melting (SLM), если это касается металлических порошков.

Активное внедрение основанных на этих и других методах 3D-печати аддитивных технологий в аддитивное производство требует унификации предъявляемых требований к получаемым не нем изделиям, которые определяли бы их качество. Целью данной работы является формулировка складывающейся проблематики определения качества 3D-печати, а также определение возможных путей ее решения. Актуальность работы обусловлена еще и отсутствием на территории Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран национальных стандартов (или единого стандарта), которые напрямую предлагали решать проблему определения качества 3D-печати изделий. При этом следуют отметить наличие действующих в Российской Федерации государственных стандартов [7, 8], которые предъявляют определенные требования к материалам как исходным, используемым при 3D-печати вышеперечисленными методами.

1. Количественная формализация критерия качества. Как следует из анализа тематических работ [7–10], раскрывающих понятие качества выпускаемой продукции, то под ним, как правило, понимают совокупность ее функциональных и потребительских свойств, обуславливающих пригодность потребления в соответствии с предназначением. Причем, если потребительские свойства продукции в большей степени определяются с учетом существующего товарообмена (или складывающейся конъюнктуры рынка), то функциональные свойства продукции,

в основном, определяются структурными и физико-механическими свойствам материалов, из которых продукция произведена. Если принять во внимание последнее, а также современную теорию автоматов [11–14], раскрывающую принципиальные возможности роботизированных производств, на которых используется микропроцессорное программно-управляемое числовыми методами технологическое оборудование, связанное между собой внутренней локальной цифровой сетью, интегрированной во внешнюю региональную или даже глобальную, то становится понятным, что из-за существования ограниченной точности работы входящих в состав такого оборудования исполнительных механизмов и обрабатывающего инструмента при изготовлении партии однотипной продукции, в ней никогда не будет хотя бы двух абсолютно идентичных изделий. Применительно к рассматриваемым методам РЭМ, ЛФП и СЛС 3D-печати это, в частности, объясняется их не идеальностью, подтверждающейся, хотя бы наличием общеизвестных [1–6], присущих им достоинствам и недостаткам (табл. 1). Но имеющиеся в этой партии однотипные изделия можно считать одинаковыми в пределах допускаемой погрешности, которую, как правило, производитель стремится установить с учетом возможностей его производства (де-факто). На допускаемую погрешность также могут оказывать влияние желания и возможности потребителя, складывающаяся в стране народно-хозяйственная политика, в целом, и ценовая политика, в частности, относительно которой оценивается социальная значимость выпускаемой продукции. Урегулировать эти противоречия пытаются и с помощью действующих нормативно-технических правовых актов (де-юре), к которым, например, относятся международные, государственные и отраслевые стандарты, включая стандарты предприятий.

В контексте вышеизложенного под количественным пониманием качества получаемых изделий при 3D-печати вышеуказанными методами, будем иметь ввиду разброс показателей $[p]_{\text{вп}}$, характеризующих не только линейные размеры, но также и структурные, и физико-механические свойства используемого материала. Этот разброс лежит в пределах допускаемой погрешности или

Таблица 1. Преимущества и недостатки известных методов 3D-печати

Технология	ПЭМ	ЛФП	СЛС
Преимущества	Производство крупных изделий и совместимость с широким спектром термопластичных полимеров. Подходит для функциональных прототипов, недорогих производственных деталей и простых геометрических форм	Производство высоко-детализированных изделий с низкой шероховатостью. Подходит для применений в производстве изделий, требующих высокой точности, к числу которых, например, относятся ювелирные изделия, стоматологические модели и формы прототипов	Универсалны при выборе материалов, включая нейлон, полиамид и металлические порошки. Используется при производстве функциональных и высокопрочных деталей, как правило, небольших производственных партий. Высокие прочностные физико-механические свойства
Недостатки, предел точности 3D-печати	Полученные детали, как правило, имеют более низкое разрешение и качество поверхности в сравнении с другими технологиями. Причина заключается в текучести жидких полимеров в условиях нормального давления, при котором 3D-печать осуществляется. Из-за этого ограничения толщина наплавленного слоя не может быть меньше 100 мкм. при точности вертикального позиционирования ± 10 мкм и горизонтального (на плоскости) ± 10 мкм	Из-за физико-механических свойств, присущих фотополимерным смолам, получаемые изделия могут иметь более низкие показатели прочности и эластичности, чем получаемые ПЭМ, позволяющие использовать более широкую номенклатуру полимеров. Предельная точность 3D-печати этим методом определяется размерами получаемых при фотополимеризации макромолекул, размерами фокусного пятна, а также точностью вертикального позиционирования ± 10 мкм и горизонтального (на плоскости) ± 10 мкм	В сравнении с ПЭМ или ЛФП имеет более высокие удельные энергозатраты на единицу объема получаемого при 3D-печати изделия и последующей финишной термической и механической обработки. Предельная точность 3D-печати этим методом определяется погрешностью фракций и сферичностью, размерами фокусного пятна, а также точностью вертикального позиционирования ± 10 мкм и горизонтального (на плоскости) ± 10 мкм

в пределах границ допускаемых отклонений $|\Delta_i|_D$ от заданных производителем эталонных значений $[p_i]_Э$. Если это принять во внимание, то тогда критерий качества получаемых после 3D-печати изделий каждого в отдельности или в пределах одной контрольной партии можно устанавливать исходя из одного или нескольких интервалов допустимых абсолютных отклонений $|\Delta_i|_D = |[p_i]_{ВП} - [p_i]_Э|$ в рамках следующего формализованного логического выражения:

$$\begin{cases} IF [p_i]_{ВП} - [p_i]_Э > |\Delta_i|_D THEN ВП=БРАК (It is Defect) \\ IF [p_i]_{ВП} - [p_i]_Э < |\Delta_i|_D THEN ВП=КАЧЕСТВО (It is Quality) \end{cases} \quad (1)$$

где ВП – выпускаемая продукция.

Если считать, что выпуск получаемой после 3D-печати известными методами продукции подчиняется закону нормального распределения [15, 16], то в рамках этого распределения через критерий качества выражения (1) можно, при необходимости, ввести вероятностную (Ω) оценку продукции, соответствующей высшему (ВК), первому (I) и второму (II) сорту:

$$\Omega_i(p_i) = \frac{1}{|\Delta_i|_D \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left[\frac{|\Delta_i(ВП)|}{|\Delta_i|_D} \right]^2 \right), \quad (2)$$

$$\Omega_{ВК} \left(|\Delta_i(ВП)| \leq \frac{|\Delta_i|_D}{3} \right), \quad \Omega_I \left(|\Delta_i(ВП)| \leq \frac{|\Delta_i|_D}{2} \right), \quad (3)$$

$$\Omega_{II} \left(|\Delta_i(ВП)| \leq |\Delta_i|_D \right),$$

$$|\Delta_i(ВП)| = |[p_i]_{ВП} - [p_i]_Э|. \quad (4)$$

Тогда при выпуске продукции на аддитивном производстве, использующем 3D-печать вышеуказанными методами, с помощью выражений (1), (2) и (4) можно проводить оценку вероятности появления бракованной продукции, а с помощью (1)–(4) –

вероятности получения продукции высшего, первого и второго сортов.

2. Учет шероховатости как систематически появляющейся случайной погрешности 3D-печати.

Каждая из представленных в табл. 1 технологий содержит параметры, влияющие на конечное качество формируемых изделий. Качество изделий, изготовленных 3D-печатью, определяется точностью воспроизведения геометрии, механическими свойствами, структурной однородностью и отсутствием дефектов, таких как пористость и остаточные напряжения. Одной из основных проблем качества является необходимость контроля и обеспечения стабильности процесса производства.

Среди одного из методов оценки качества напечатанной продукции выделяют дифференциальный метод оценки по единичному показателю, в частности оценку качества поверхности, т. е. соответствие всех отклонений допускаемым диапазонам. При этом допускаемое отклонение может характеризоваться визуальными составляющими, глубиной или площадью дефектов [15].

Общим параметром оценки качества поверхности напечатанного изделия является его ступенчатость. Процесс послойного изготовления изделий вносит вероятность возникновения погрешностей относительно размеров прототипа в сравнении с первоначальной компьютерной 3D-моделью, основными из которых являются слоистость боковых и ступенчатость наклонных граней. В работе [17] показано снижение ступенчатости поверхности за счет изменения угла поворота изделия с целью качества рабочих поверхностей прототипа.

Наиболее простым из методов оценки качества поверхности изделия является визуальная оценка видимых дефектов. Однако наряду с электронными измерителями, она не дает достаточной точности на производстве (рис. 1).

Шероховатость поверхности в сочетании с физическими свойствами материала детали определяет ее состояние и является, наряду с точностью формы, одной из основных геометрических характеристик ее качества. Одним из путей определения качества формируемых при 3D-печати изделий является приме-

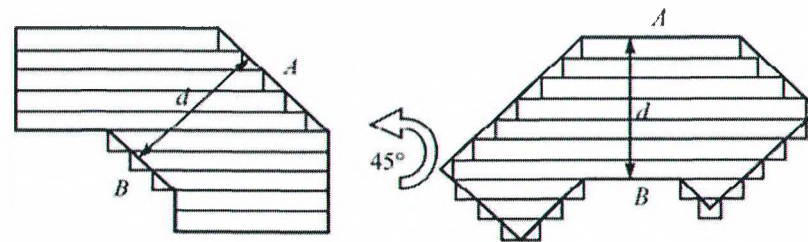


Рис. 1. Схема снижения погрешности граней A и B за счет корректировки угла при вращении 3D-модели на 45° [17]

нение профилограмм (рис. 2). При этом среднее арифметическое отклонение профиля R_a предпочтительно из высотных параметров, и наиболее полно его отражает [18].

В работе [19] предложена система апробации результатов оценки качества 3D-печати при использовании цифрового микроскопа. Повышение качества FDM 3D-печати произведено за счет нивелирования («компенсирования») вариабельности диаметра прутка (см. табл. 2).

Использование цифрового микроскопа также может касаться и оценки боковых поверхностей изделий, однако данный метод

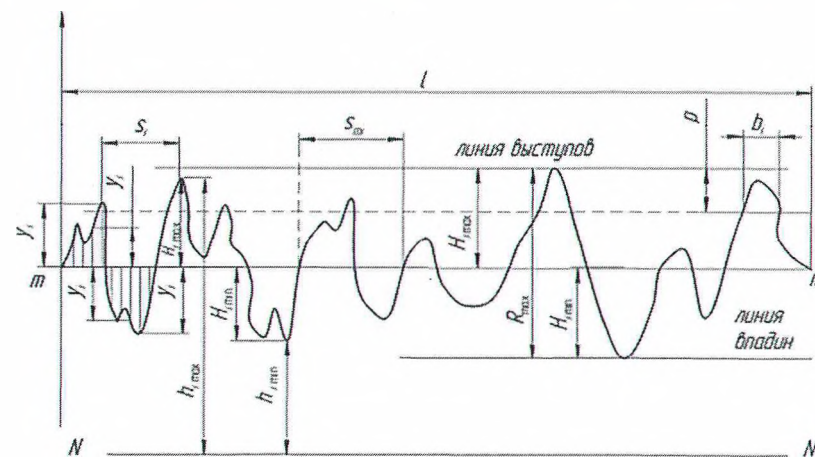
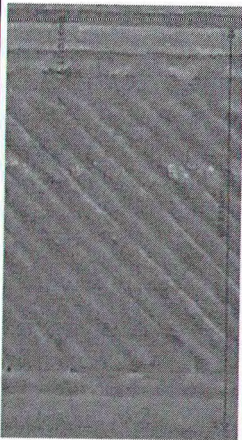


Рис. 2. Схема профилограммы на участке поверхности [18]

Таблица 2. Влияние вариальности диаметра филамента на качества 3D-печати [19]

№ п/п	Вариации измененных технологических параметров FDM печати	Фотоизображение первого слоя с цифрового микроскопа	$Z_{p\ max}^*$ мм	$Z_{c\ max}^*$ мм
1	Диаметр совместимости материала (экструдера): 1,7 мм Диаметр (прутка): 1,7 мм		0,21	0,8
2	Результат проведения вариальности диаметра прутка $K_F = 125\%$		0	0,14

ограничен разрешением оптической системы и не подходит для достаточного изучения поверхностей после их 3D-печати в микро- и макрорасширении. Вместе с тем наиболее наглядным в может оказаться метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) [20]. В качестве примера рассмотрим (рис. 4) поверхность образца, полученного 3D-печатью порошком титанового сплава ВТ6 [21] (Ti-4Al-6V), методом СЛС. Фракционный состав этого порошка не превышал 50 мкм и в нем преимущественно (70 %) преобладали частицы, диаметр которых лежал в узком диапазоне 40–50 мкм.

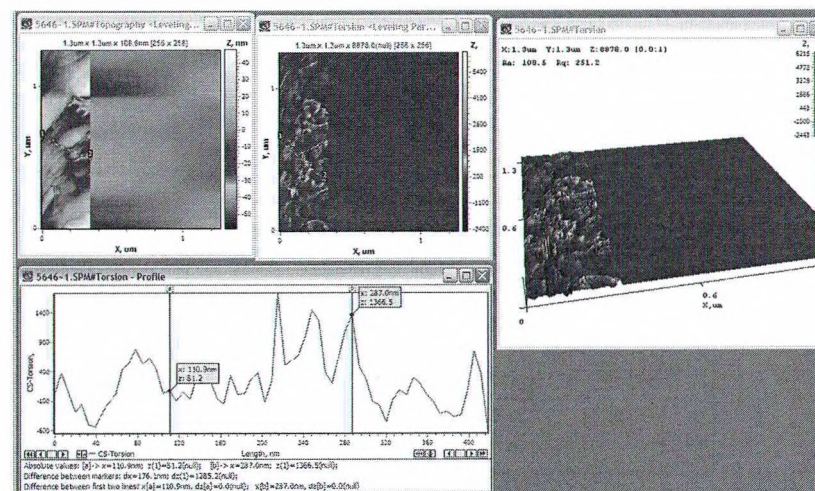


Рис. 3. Результаты исследования поверхности на АСМ

Приведенная на рис. 3 профилограмма поверхности исследуемого порошка позволяет сделать вывод о том, что на ее волнистую основу, имеющую перепады высот между вершинами и впадинами на уровне 40 мкм, в среднем, накладывается дополнительная шероховатость, сформировавшаяся при кристаллизации расплава, перемещающегося вслед за фокальным пятном лазерного излучения во время СЛС. Перепад высот между вершинами и впадинами такой шероховатости в среднем составляет 1,2 мкм.

3. Природа дефектообразования при СЛС металлических порошков и контроль качества этого процесса. Как следует из анализа работ [1–6, 21], СЛС является родственным процессом сварки плавлением металлов. При описании процессов СЛС, как и при наплавке металлическими порошками, в качестве модельного допущения используется классическая для теории сварки модель точечного теплового источника, движущегося по разогреваемой поверхности. Как и при сварке, в процессах СЛС к этому источнику предъявляются требования, согласно которым он при своем движении должен обеспечивать локальное плавление (ЛП) частиц порошка. ЛП тесно связывают с такими физическими процессами, как поглощение и передача лазерной энергии, формирование ванны расплава, превращение микроструктуры, и испарения, связанных с резким перепадом температур в зонах термического воздействия. В процессах СЛС ЛП должно происходить на поверхности порошкового слоя с образованием подвижной микрованны расплава, за которой следуют тянувшийся след в виде зоны кристаллизации, а также характерной для сварочных процессов зоны термического влияния. Поэтому природа дефектообразования при СЛС металлических порошков такая же, как и при сварке металлов плавлением в той ее части, которая относится к порошковой наплавке.

Кроме этого, осуществлению 3D-печати сопутствует ряд ограничений, связанных не только с реализацией передаточных механизмов 3D-принтеров, но и программным обеспечением, значительно зависящим от технических характеристик используемого оборудования. При этом коридор возможностей современных 3D-принтеров определяется не только ограничениями, связанными с аппаратным и программным обеспечением, но и узким диапазоном исходных порошковых композиций, зависящих от свойств материалов, входящих в их состав. Важно также учитывать взаимосвязь этих ограничений между собой. Так, например, программное обеспечение позволяет контролировать параметры процесса, влияющие на дефекты структурообразования, при этом определяемые режимами 3D-печати. Другим примером такого взаимодействия является взаимосвязь мощности со ско-

ростью перемещения потока лазерного луча по сплавляемой поверхности порошкового слоя во время 3D-печати.

Одним из условий формирования качественных изделий при СЛС является соблюдение равновесия между мощностью излучения лазерного луча и скоростью его перемещения по поверхности порошковой композиции. Изменение мощности и скорости потока лазерного луча прямо пропорционально влияет на глубину проникновения теплового потока в формируемом порошковом слое, а также площади образуемой ванны расплава.

Исходя из этого, на дефектообразование при ПЭМ, ЛФП и СЛС оказывают влияние не только режимы 3D-печати, но и точность исполнения механизмов 3D-принтеров. Если последнее в большей степени определяет геометрические отклонения от заданных размеров получаемой на аддитивном производстве продукции, то первое (режимы 3D-печати) в структуре материала этой продукции может формировать характерные внешние и внутренние дефекты. При этом среди внутренних дефектов выделяют:

эффект «порообразования», проявляющегося в виде небольших полостей в структуре печатаемого объекта с газовым содержанием, формируемым в процессе плавления;

эффект «трещинообразования», возникающий в результате резкого изменения температур и, как следствие, его неравномерного распределения.

К внешним дефектам 3D-печати, как и в отношении родственных сварочных процессов [21, 22], относят недопустимые отклонения от заданных геометрических размеров. Среди таких дефектов выделяют:

недостаточное проплавление, которое может возникнуть из-за неправильной настройки оборудования или недостаточной энергии лазера;

перекос и деформации могут быть вызваны неравномерным распределением температур или несовпадением параметров процесса с исходным сырьевым материалом;

поверхностные дефекты, включающие в себя дефекты формы, трещинообразование на поверхности, а также эффект «ка-

плеобразования», при котором сила поверхностного натяжения превосходит сумму динамических сил, силу тяжести, и силу адгезии. На сформированном слое порошка появляются не сплошные проплавленные участки, а в некоторых случаях отдельные «капли», что приведет к низким характеристикам формируемого изделия.

Исходя из этого, для определения качества получаемой продукции на аддитивном производстве, кроме выборочных методов определения механической прочности, также следует применять визуальный и выборочный оптический контроль поверхности и структуры материала продукции, который применяется в сварочном производстве [21, 22]. При этом при проведении визуального контроля могут использоваться такие универсальные инструменты, как штангенциркуль, линейка и микрометр, включая лупу или малогабаритный переносной металлургический микроскоп. Одновременно с этим следует учитывать, что исследование структуры методами микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов способствует определению ее консистентности, неоднородности химического состава, а также выявлению нежелательных включений. Обнаружение пор или пустот в структуре проводят при использовании рентгеноскопического и акустического анализов.

Выводы

1. Современное аддитивное производство, основу которого составляют аддитивные технологии 3D-печати различными методами, в настоящее время переживает интенсивное развитие и расширение сферы своего применения, которая уже охватывает различные отрасли народного хозяйства, включая бытовую сферу. Одни из самых распространенных методов 3D-печати, используемыми в аддитивных технологиях, являются селективная послойная экструзия материалов (ПЭМ), лазерная фотополимеризация (ЛФП) и селективное лазерное сплавление (СЛС). Выпускаемая на аддитивном производстве продукция требует унифицированного подхода оценки ее качества с учетом особенностей 3D-печати, например, методами ПЭМ, ЛФП и СЛС.

2. В выработке унифицированного подхода оценки может использоваться предложенный в данной работе подход, который включает в себя количественное понятие установки доверительного интервала, на основании которого получаемой на аддитивном производстве продукции можно присваивать высшее качество.

3. Предлагаемый подход по оценке качества получаемой на аддитивном производстве продукции предлагает при оценке качества использовать применяемые в сварочном производстве методы контроля качества.

Список использованных источников

1. Зеленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зеленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. – 220 с.
2. Технология аддитивного производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер / Перевод. с англ. под ред. И. В. Шишковского. – М. : Техносфера, 2016. – 656 с.
3. Аддитивные технологии / А. И. Рудской и [др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 299 с.
4. Тарасова, Т. В. Аддитивное производство : учеб. пособие / Т. В. Тарасова. – М. : Станкин, 2019. – 196 с.
5. Голоднов, А. И. Технологии и оборудование аддитивного производства : учеб. пособие / А. И. Голоднов, С. Н. Злыгостев, И. Е. Фурман. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 128 с.
6. Ильющенко, А. Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия / А. Ф. Ильющенко. – Минск: Медисонт, 2019. – 260 с.
7. Аддитивные технологии. Данные об образцах для испытаний, изготовленных с применением аддитивных технологических процессов. Общие требования» (ООО «РусАТ»): ГОСТ Р 59929–2021. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 16 с.
8. Аддитивные технологии. Образцы для испытаний. Оценка геометрических способностей систем аддитивного производства» (ООО «РусАТ»). ГОСТ Р 59586–2021/ИСО/АСТМ 52902:2019. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 40 с.
9. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 15467-79. – М. : Стандартинформ, 2009. – 22 с.
10. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования: ГОСТ Р 57586–2017. – М. : Стандартинформ, 2019. – 8 с.
11. Кудрявцев, В. Б. Теория автоматов : учеб. для вузов / В. Б. Кудрявцев, С. В. Алешин, А. С. Подколзин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2024. – 320 с.
12. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений: пер. с англ. / Д. Хопкрофт [и др.] – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2008. – 528 с.
13. Робототехника: История и перспективы / И. М. Макаров, Ю. И. Топчиев. – М. : Наука; МАИ, 2003. – 352 с.

14. Иващенко, Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н. Н. Иващенко. – Изд. 4., перераб. – М. : Машиностроение, 1978. – 736 с.
15. Пугачев, В. С. Основы статистической теории автоматических систем / В. С. Пугачев, И. Е. Казаков, Л. Г. Евланов. – М. : Машиностроение, 1974. – 400 с.
16. Методика определения качества селективного лазерного сплавления металлических порошков / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 16-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2024. – С. 19–21.
17. Шумков, А. А. Влияние ориентации модели в процессе построения на точность формы прототипа / А. А. Шумков, Т. Р. Абляз // Вестн. ПНИПУ Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 3 – С. 198–205.
18. Сурус, А. И. Нормирование точности и технические измерения : учеб.-метод. пособие для студентов / А. И. Сурус, А. В. Блохин. – Минск : БГТУ, 2014. – 198 с.
19. Загидуллин, Р. С. Экспериментальное исследование и способ повышения качества FDM 3D-печати за счет нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента / Р. С. Загидуллин, В. Д. Жуков, Н. В. Родионов. // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 3. – С. 265–271.
20. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие. – Н. Новгород : Институт физики микроструктур РАН, 2004. – 110 с.
21. Дёмин, Е. А. Сварка, родственные процессы и технологии : учеб.-практ. пособие в вопросах и ответах / Е. А. Дёмин, И. В. Суздалев. – М. : Грифон, 2022. – Т. 1. – 672 с.
22. Денисов, Л. С. Контроль и управления качеством сварочных работ / Л. С. Денисов. – Минск : Вышэйш. шк., 2016. – 619 с.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ ИЗ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПОМОЩИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СКЛЕИВАНИЯ И ПОСЛОЙНОГО НАНЕСЕНИЯ ПРОДУКТА

М. Л. Калиниченко, В. А. Калиниченко

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

В работе рассмотрены актуальные подходы при создании модельных комплектов для мелкосерийного производства на основе отходов алюминиевых сплавов. Показан процесс испытания модельной оснастки при формовке песчано-смоляных смесей. Приведены примеры получаемых отливок различ-