

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №1 (175). С.3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №1 (175). P.3-11.

Научная статья
УДК 658.512.26:621.762
doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-3-11

Оценка технологичности конструкции детали сложной геометрической формы, изготовленной по технологии селективного лазерного сплавления

Гамид Хайбулаевич Ирзаев, к.т.н.
Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия
irzaevghk@dstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5694-9504>

Аннотация. Обеспечение технологичности конструкций деталей, изготавливаемых с использованием аддитивных технологий, требует совершенствования и разработки нормативно-справочных материалов для эффективной и объективной оценки этого свойства конструктором на ранних стадиях проектирования. В условиях многовариантного проектирования изделий машиностроения, изготавливаемых с применением аддитивных технологий, задача выбора наилучшей альтернативы с точки зрения технических характеристик, функциональности, технологичности и себестоимости становится актуальной. Предложена система специфических для аддитивного производства количественных показателей технологической рациональности конструкции деталей, изготавливаемых по технологии селективного лазерного сплавления: геометрическая сложность изготовления, коэффициент использования материала и коэффициент постобработки, учитывающий трудоемкость постобработки и доводки шероховатости поверхности детали до назначенных конструктором значений. Показано, что геометрическая сложность изготовления изделия зависит от сложности его конструкции, заложенной в 3D-модель, и скорости создания детали с помощью лазерного сплавления слоев. Уточнен коэффициент использования материала для аддитивных деталей с учетом повторно используемого порошка и порошка для создания поддерживающих конструкций. Для корректной оценки технологичности изделий, полученных с использованием аддитивных технологий, рекомендовано также ввести частный коэффициент, учитывающий трудоемкость постобработки изделия после 3D-печати. Предложенная группа показателей, оценивающих принятые конструктивные формы, рациональность состава и структуры исполнения детали, может быть применена на различных этапах разработки конструкторской документации. В качестве примера произведен расчет показателей для ребристого радиатора, отводящего тепло от электронных компонентов. Он позволил на ранних стадиях проектирования выбрать наиболее эффективный по технологичности вариант изделия.

Ключевые слова: геометрическая сложность изготовления, деталь, коэффициент использования материала, селективное лазерное сплавление, технологичность конструкции, толщина слоя, трудоемкость постобработки

Для цитирования: Ирзаев Г.Х. Оценка технологичности конструкции детали сложной геометрической формы, изготовленной по технологии селективного лазерного сплавления // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 1 (175). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-3-11

Workability test for selective laser-melted parts having complex geometric shape

Hamid Kh. Irzaev, PhD. Eng.
Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia
irzaevghk@dstu.ru

Abstract. Ensuring the manufacturability of component designs manufactured using additive technologies requires the improvement and development of normative and reference materials for the designer's effective and objective assessment of this property in the early stages of design. In the context of multi-variant design of mechanical engineering products manufactured using additive technologies, the task of selecting the best alternative in terms of technical characteristics, functionality,

manufacturability, and cost becomes relevant. A system of quantitative indicators specific to additive manufacturing for the technological rationality of the design of components manufactured using selective laser melting is proposed: geometric manufacturing complexity, material utilization factor, and a post-processing factor accounting for the labor intensity of post-processing and finishing the surface roughness of the component to the values specified by the designer. It is shown that the geometric complexity of product manufacturing depends on the complexity of its design, embedded in the 3D-model, and the speed of part creation using laser melting of layers. The material utilization factor for additive parts is refined, taking into account reused powder and powder used to create supporting structures. To accurately assess the manufacturability of products manufactured using additive technologies, it is also recommended to introduce a partial coefficient accounting for the labor intensity of post-processing after 3D-printing. The proposed set of metrics, which evaluate the adopted design forms, the rationality of the composition, and the structure of the part's execution, can be applied at various stages of design documentation development. As an example, the metrics were calculated for a finned heat sink dissipating heat from electronic components. This allowed the selection of the most manufacturable product variant at the early design stages.

Keywords: manufacturing geometric complexity, part, material utilization factor, selective laser melting, workability, layer thickness, after-treatment complexity

For citation: Irzaev H.Kh. Workability test for selective laser-melted parts having complex geometric shape / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 1 (175). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-3-11

Введение

Популярность аддитивных технологий в последнее время растет, но до сих пор нет системных подходов по технико-экономическому обоснованию их применения в рамках существующих на машиностроительном производстве циклов «проектирование – освоение – изготовление». Цифровые экосистемы для аддитивного проектирования и генеративного дизайна, предлагаемые сегодня на рынке современных решений, подтверждают свою эффективность на промышленных предприятиях, способствуя сокращению издержек производства, повышая точность и надежность изделий [1].

Одним из барьеров на пути полноценного использования аддитивных технологий в промышленном производстве является отсутствие методической базы нормирования аддитивного производства, оценки технологичности конструкций напечатанных изделий, экономической и технологической целесообразности применения этих технологий. Учитывая все еще высокую себестоимость изготовленных аддитивными технологиями изделий по сравнению с изделиями, полученными традиционными методами обработки материала, важным направлением становится регулирование себестоимости – показателя, являющегося ключевым для обеспечения технологичности конструкций изделий. Снижение себестоимости производства через оптимизацию накладных расходов и тесная кооперация с российскими производителями и поставщиками порошков и других материалов становится условием обеспечения конкурентоспособности

изделий, полученных с использованием 3D-печати.

Назрела необходимость оценки степени соответствия проектируемых изделий специфическим требованиям и возможностям аддитивного производства с точки зрения обеспечения технологичности их конструкции. В условиях многовариантного проектирования изделий машиностроения, изготавливаемых с применением аддитивных технологий, становится актуальной задача выбора лучших альтернатив не только по техническим характеристикам и функциональности, но и по критериям технологичности, трудоемкости изготовления и себестоимости. Важность оценки технологичности конструкций деталей, изготовленных с применением аддитивных технологий и необходимость учета проектировщиками при такой оценке специфических характеристик оборудования, процесса, порошкового материала, геометрической сложности изделий подчеркивают зарубежные авторы публикаций [2 – 5]. Как справедливо отмечается в работе [6], оценка показателя технологичности конструкций для аддитивных технологий требует совершенствования и адаптации наработанных ранее стандартов и методик с целью сделать процесс оценки более эффективным и объективным для конструктора.

Хотя аддитивное производство предоставляет проектировщику неограниченную свободу в конструировании изделий любой сложной геометрии, ограничения вытекают по вопросам, связанным со структурной целостностью, геометрической точностью, окончательной стоимостью, что должно быть интегрировано в оценку технологичности конструкции. В работе [7] оценка времени

изготовления изделий, зависящая от скорости сканирования лазера, толщины слоя порошка и шага штриховки, признается параметром, оказывающим влияние на технологичность, себестоимость и расход материала при селективном лазерном сплавлении (SLM – Selective Laser Melting). Исследование [8] посвящено критическим факторам при оценке технологичности конструкции изделия на ранних этапах проектирования – времени изготовления и геометрической сложности.

Цель статьи – разработать и предложить систему специфических для аддитивного производства количественных показателей технологической рациональности конструкции деталей для поддержки принятия решений и прогнозирования технологичности конструкций изделий на ранних этапах проектирования с целью сокращения времени изготовления и стоимости изделий. Показатели и рекомендации рассматриваются для технологии селективного лазерного сплавления.

Материалы и методы

Технология плавки порошков из металлов с использованием лазерного луча – широко распространенный метод аддитивного производства, особенно эффективный и производительный для изделий, имеющих тонкие стенки и сложную геометрию поверхности. Одним из ключевых параметров процесса сплавления, создающим компромисс между качеством поверхности и производительностью процесса, выступает толщина слоя порошка. Чем тоньше слой, тем качественнее структура поверхности (пористость, плотность). Но если толстый слой плавится, то быстрее общая скорость изготовления изделия, хотя при этом страдает

качество детали. Таким образом, толщина слоя порошка на рабочей платформе непосредственно влияет на трудоемкость процесса, а значит, прямо связана с технологичностью конструкции. Технологичность конструкции определяется, в том числе, приспособленностью ее к изготовлению с меньшими затратами времени, т.е. хроноёмкость изготовления изделия зависит от геометрической сложности изделия и режимов работы аддитивного оборудования. Скорость создания детали можно определить по формуле

$$v_d = vlm, \quad (1)$$

где v – скорость перемещения лазера (сканирования); l – высота детали; m – толщина слоя. Фактически это объемная скорость изготовления, при проектировании изделий для изготовления аддитивными технологиями предпочтительны высокие скорости изготовления.

Введем показатель геометрической сложности для изготовления изделия, который коррелируется со сложностью конструкции детали, заложенной в 3D-модели, и скоростью создания детали с помощью лазерного сплавления слоев.

Геометрическая сложность изготовления S может определяться по формуле:

$$S = \frac{t_n}{t_{\min}} \frac{R_d}{R_\phi} 100 \%, \quad (2)$$

где t_n – время, необходимое для изготовления детали; t_{\min} – минимальное время изготовления детали; R_d – объем детали; R_ϕ – объем параллелепипеда или цилиндра, в зависимости от формы детали, ограничивающего ее (рис. 1).

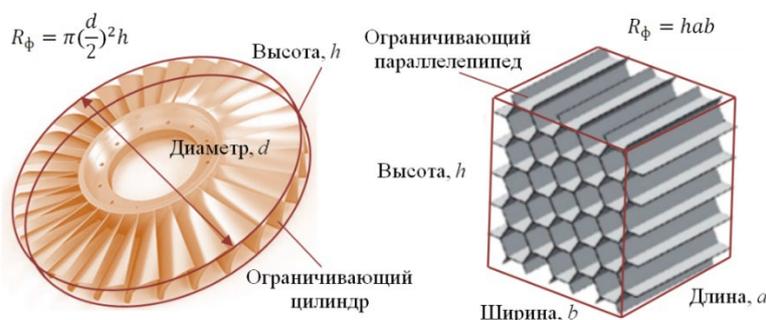


Рис. 1. Пример расчета объемов фигур, ограничивающих детали, изготовленные с применением аддитивных технологий

Fig. 1. An example of calculating the volume of shapes that limit parts made through additive technologies

Учитывая, что идеальным или минимально возможным временем изготовления детали считается время одного прохода сканера, т.е. когда деталь изготавливается лазерным

сплавлением одного слоя ($l = m$), формулу (2) с учетом (1) окончательно преобразовываем в вид

$$S = \left(1 - \frac{V_d l m R_d}{V_d l l R_\phi}\right) 100\% = \left(1 - \frac{m R_d}{l R_\phi}\right) 100\% \quad (3)$$

Для переменных толщин слоев одной детали в формулу (3) вместо m можно рассчитать и подставить среднее значение $\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$. Аналогично высоту изделия также можно определить, как среднее значение \bar{l} .

Идеальный показатель геометрической сложности будет достигать 0 %, когда толщина слоя равна высоте детали, а деталь полностью занимает свой ограничивающий контур, что указывает на минимальную сложность и минимальное время изготовления детали, множители в формуле (3) превращаются в 1. Чем больше по величине показатель S , тем менее технологично изделие.

Анализ показывает, что компактная геометрия, оптимальное распределение материала и высокая эффективность скорости процесса сплавления имеют решающее значение для повышения технологичности аддитивных деталей. Еще на этапах проектирования конструкции изделия необходимо учитывать ограничения, накладываемые технологией SLM, и избегать излишних конструктивных элементов, например не закладывать слишком тонкие стенки, острые углы, сложные каналы и отверстия, высокие требования по шероховатости, сокращать по возможности поддерживающие структуры.

Другой показатель – коэффициент использования материала, характеризующий степень экономного расходования материала, является, по существу, показателем совершенства той или иной производственной технологии. Практика показывает, что если при литье под давлением или горячей объемной штамповке деталей, коэффициент использования материала составляет 0,78...0,92, то при SLM достигает значений 0,92...0,98 [9]. Показатель для любых деталей, изготовленных с применением традиционных технологий, определяется по классической формуле

$$K_{им} = \frac{M_d}{M_m}, \quad (4)$$

где M_d – масса детали; M_m – масса материала (заготовки), израсходованного на изготовление детали.

Для изделий, изготовленных с использованием аддитивных технологий, формула остается справедливой, но знаменатель можно разбить на составляющие с учетом расхода материала (порошка) при 3D-печати. Хотя послойное лазерное сплавление минимизирует отходы используемого порошка, однако требует дополнительного объема для создания поддерживающих конструкций. В процессе расплавки изделие должно быть погружено в порошок, который служит опорой для составных частей детали и помогает созданию тонких стенок, перегородок, выступов, нависающих частей и др. Рабочий порошок, оставшийся после технологического процесса, извлекается из камеры и повторно используется, однако имеются потери от 3 до 9 % при его отсеивании. С учетом этих особенностей аддитивных технологий предлагается формулу коэффициента использования материала (4) уточнить следующим образом:

$$K_{им} = \frac{M_d}{(M_{ид} + M_{пк}) - M_{пи}}, \quad (5)$$

где $M_{ид}$ – масса порошка, израсходованная для изготовления детали; $M_{пк}$ – масса порошка, использованная для создания поддерживающих конструкций; $M_{пи}$ – масса порошка, повторно использованного после извлечения из камеры. С увеличением значения показателя $K_{им}$ технологичность конструкции детали улучшается за счет более рационального использования порошка.

Масса детали M_d в формуле (1) на ранних стадиях проектирования может быть определена исходя из объема и плотности детали,

прописанной в электронной конструкторской документации (КД), как

$$M_d = R_d \rho.$$

Для деталей, полученных лазерным сплавлением из порошка металла, исследования показывают, что высокая пористость в виде наличия газовых и скважных пор, трещин приводит к снижению механических и усталостных свойств деталей и преждевременному их разрушению, зависит от характеристик установки SLM. Для примера на рис. 2 показана зависимость относительной плотности (отношение абсолютной плотности материала к плотности воды при температуре 4 °С) алюминиевых образцов, от мощности лазерного луча и скорости сканирования [10]. В работе [11] по результатам экспериментальных исследований выведена зависимость пористости P от мощности лазерного излучения W и продольной подачи лазерного луча S в виде уравнения регрессии:

$$P (\%) = 22,3525 - 0,1085W + 7,7 \cdot 10^{-3}S.$$

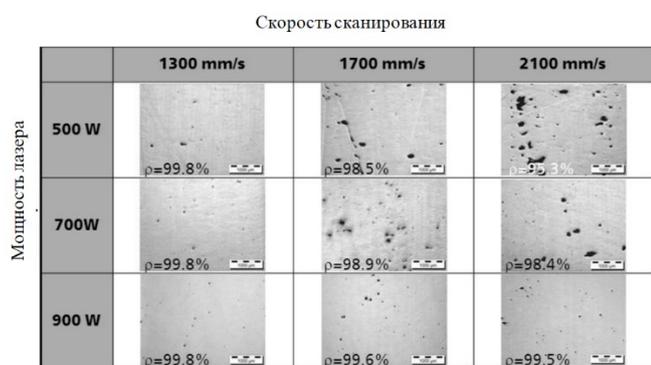


Рис. 2. Поперечные сечения образцов с указанием относительной плотности в зависимости от скорости сканирования и мощности лазера [10]

Fig. 2. Cross-sections of samples with indication of relative density depending on scanning speed and laser power [10]

С точки зрения изготовления с помощью аддитивных технологий геометрически сложные поверхности деталей требуют затрат большего времени на изготовление и могут породить появление многочисленных дефектов. Можно предположить, что чем сложнее по геометрии деталь, тем ниже $K_{им}$ для него, так как потребуются создание большего количества

элементов поддержки, следовательно, увеличение потерь порошка. Результаты оценки $K_{им}$ на ранних стадиях проектирования должны быть использованы для улучшения условий выполнения технологических операций аддитивного производства, рациональное использование отходов.

Шероховатость поверхности детали является параметром, оказывающим большое влияние на технологичность конструкции и имеющим решающее значение для формирования эксплуатационных характеристик и долговечности изделия. Шероховатость формирует множество микроскопических впадин, выпуклостей, неровностей поверхности и является важнейшей характеристикой материала, которая учитывается при проектировании и изготовлении деталей, особенно, прецизионных.

Различают три способа оценки шероховатости: как среднеарифметическое отклонение профиля Ra , высота неровности профиля, рассчитанная по десяти точкам Rz и полная высота профиля R_{max} . Согласно наиболее широко применяемой оценке шероховатости Ra , если значение поверхности $Ra < 0,5$ мкм, то микрорельеф считается гладким, при $Ra 0,5...1,0$ мкм – минимально шероховатым, при $Ra 1,0...2,0$ мкм – умеренно шероховатым и при $Ra > 2,0$ мкм – очень шероховатым.

Выброс твердых веществ или жидкостей из зоны расплава, известный как разбрызгивание, является типичным явлением в процессах лазерного производства. Оно вызвано потоком газа и отрицательно влияет на шероховатость поверхности. Значение шероховатости зависит от мощности лазера, скорости сканирования, давления окружающей среды, используемого сплава, дисперсности порошка. Обработанные технологией SLM поверхности могут достигать шероховатости $Ra 10...20$ мкм, а использованная постобработка может снизить шероховатость до $Ra 0,5...2$ мкм. К постобработке в аддитивном производстве относят отделение детали от платформы, удаление опорных конструкций, остатков порошка, поддерживающих элементов, просеивание порошка, шлифовку, полировку, термическую обработку, контроль качества и др. Затраты на постобработку могут составлять до 70 % от себестоимости деталей, изготовленных аддитивными технологиями.

При проектировании деталей показатель шероховатости назначается конструктором исходя из функционального назначения

поверхности детали (например, сопрягаемая поверхность высокоточной детали, поверхность под уплотнение, нерабочая поверхность и др.) и может быть достигнута при изготовлении селективным лазерным сплавлением без дополнительных технологий доводки либо с

привлечением постобработки при недостижении требуемой шероховатости.

Предлагается ввести частный показатель технологичности – коэффициент, учитывающий трудоемкость постобработки изделия после 3D-печати. Он определяется согласно табл. 1 с учетом степени постобработки.

1. Значения коэффициента $K_{\text{пост}}$ в зависимости от удаления поддерживающих элементов, обработки каналов, отверстий и поверхностей изделия

1. The values of the efficiency coefficient K_{post} depending on the removal of the supporting elements, the treatment of channels, holes and surfaces of the product

Качественное описание степени постобработки	Значение $K_{\text{пост}}$
Достижение в результате селективного лазерного плавления шероховатости поверхности, назначенной конструктором; удаление поддерживающих элементов вручную из внутренних каналов, отверстий, полостей и припекшегося порошка, не удаляемых установкой SLM путем продувки	1,1
Достижение в результате селективного лазерного плавления шероховатости поверхности, назначенной конструктором; удаление поддерживающих элементов из внутренних каналов, отверстий, полостей и припекшегося порошка, не удаляемых установкой SLM путем продувки, чистки и вакуумной сушки на автоматизированной установке	1,2
Доведение степени шероховатости поверхности Ra от 100 до 10 мкм; удаление поддерживающих элементов из внутренних каналов, отверстий, полостей и припекшегося порошка, путем продувки, чистки и вакуумной сушки на автоматизированной установке	1,3
Доведение степени шероховатости поверхности Ra от 10 до 2 мкм; удаление поддерживающих элементов из внутренних каналов, отверстий, полостей и припекшегося порошка путем продувки, чистки и вакуумной сушки на автоматизированной установке	1,5
Доведение степени шероховатости поверхности Ra от 2 до 0,5 мкм; удаление поддерживающих элементов из внутренних каналов, отверстий, полостей и припекшегося порошка путем продувки, чистки и вакуумной сушки на автоматизированной установке	1,7

В идеальном случае необходимость последующей обработки (пескоструйная обработка, травление, анодирование и др.) для улучшения точности обработки является нежелательной, так как может привести к снижению усталостной долговечности изделия и повышению затрат. Могут быть обработаны только места сопряжения с поверхностями других деталей, резьбовые отверстия, а также области с ограниченной усталостью, где обработанная поверхность может увеличить срок службы компонентов.

С учетом того, что получение более гладких поверхностей сопряжено с подбором

параметров оборудования, размеров частиц исходного порошка, условий технологической среды, настройки процесса печати и др., значение коэффициента $K_{\text{пост}}$ возрастает с повышением качества поверхности, чем меньше параметр Ra , тем менее технологично изделие. Например, для технологии SLM подбор параметров включает в себя настройку мощности лазера, точности позиционирования механических узлов, качества оптических систем, стабильности температурных режимов, времени экспозиции. Таким образом, дополнительная постобработка для улучшения допусков и качества поверхности изделия может привести к

ухудшению общей технологичности конструкции, так как способствует применению дорогостоящего оборудования и повышению затрат на его обслуживание.

Результаты и обсуждение

В результате исследования была предложена группа показателей технологической рациональности конструкции детали, изготовленной с применением аддитивных

технологий, которая может использоваться как частные показатели технологичности конструкции, оценивающие принятые конструктивные формы, рациональность состава и структуры исполнения детали. Показатели вынесены в табл. 2 с указанием этапов их применения на стадиях разработки. Расчет производится для альтернативных вариантов однотипных деталей с выбором той, у которой показатели технологической рациональности лучше.

2. Количественные показатели оценки технологической рациональности конструкции детали и их применение

2. Quantum indexes for testing technological rationality of the part design and their application

Наименование показателя	Обозначение	Стадия разработки КД
Геометрическая сложность изготовления	S	Эскизный проект
Коэффициент использования материала	$K_{\text{им}}$	Техническое предложение
Коэффициент постобработки	$K_{\text{пост}}$	Эскизный проект

В качестве примера расчета предложенных показателей рассмотрим изделие радиатор (рис. 3), изготавливаемое селективным лазерным плавлением из сплава РС-333 – среднепрочного алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg с высокой теплопроводностью

$\lambda = 188 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. По уровню механических и электрофизических свойств является альтернативой известному сплаву АД31, из которого изготавливаются теплопроводящие элементы по традиционным технологиям (литье, штамповка).

Характеристики детали	
Длина, см	5
Ширина, см	3
Высота, см	2
Количество ребер, шт	5
Объем детали, см ³	16,875
Объем ограничивающего параллелепипеда, см ³	30,0
Марка материала	сплав РС-333
Плотность материала, г/см ³	2,656
Масса детали, г	44,82
Шероховатость Ra , мкм	30
Характеристики процесса	
Тип установки	SLM 280 HL (Solutions)
Тип и мощность лазера, Вт	YLR-волоконный, 500
Диаметр пятна лазера, мкм	86
Толщина слоя, мкм	100
Скорость сканирования, мм/с	600

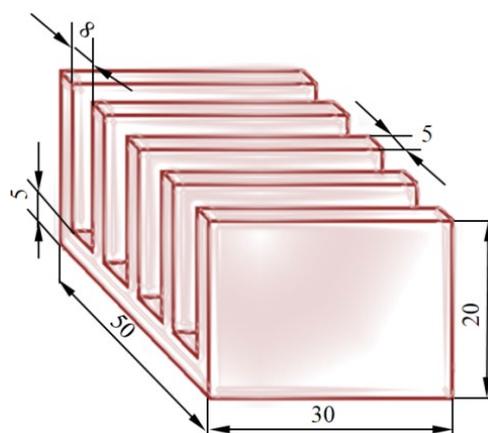


Рис. 3. Ребристый односторонний радиатор и характеристики детали и технологии его изготовления

Fig. 3. Finned one-sided radiator and the characteristics of the part and its manufacturing technology

Допустим, что изготовление радиатора будет проводиться на установке селективного лазерного сплавления SLM 280 HL со следующими характеристиками: область построения

280×280×350 мм; тип и мощность лазера – YLR-волоконный лазер, 500 Вт; диаметр пятна лазера 86 мкм; толщина слоя 20...100 мкм; возможные материалы металлические порошки,

алюминиевые сплавы, никелевый сплав, титановый сплав, кобальт-хромовые сплавы.

С учетом геометрии и материала детали, мощности лазера, диаметра лазерного пятна, и толщины слоя 100 мкм, была выбрана скорость сканирования 600 мм/с при мощности лазера 500 Вт, что обеспечивало высокую относительную плотность алюминиевого сплава примерно 91,3 %. Этот параметр важен для радиатора, отводящего тепло от электронных компонентов, так как его максимальная мощность рассеивания достигается при высокой плотности материала, без пор, трещин и дефектов.

Геометрическая сложность изготовления по формуле (3)

$$S = \left(1 - \frac{0,116,875}{30} \frac{16,875}{30,0}\right) \cdot 100 = 0,8125.$$

Коэффициент использования материала в соответствии с формулой (5)

$$K_{\text{им}} = \frac{44,82}{(45,6 + 18,2) - 15,3} = 0,924.$$

Коэффициент постобработки $K_{\text{пост}} = 1,2$ с учетом того, что шероховатость поверхности $Ra = 32$ мкм, назначенная конструктором, достигнута, но удаление поддерживающих элементов, излишков порошка было выполнено на автоматизированной установке. Коэффициент $K_{\text{пост}}$ может использоваться также как корректирующий коэффициент трудоемкости изготовления детали с помощью аддитивных технологий, если известна предварительная трудоемкость аналогов или прототипа.

В работе разработана лишь ограниченная часть показателей технологичности конструкции деталей, которая относится к технологической рациональности конструкции. Несомненно, что такие показатели, как трудоемкость изготовления, себестоимость изделия, ресурсоемкость изделия и групповые, частные показатели, раскрывающие отдельные свойства изделий, также должны рассматриваться при комплексном подходе к оценке технологичности конструкции аддитивных изделий. Предложенная группа показателей позволяет качественно решить некоторые инженерные задачи на ранних этапах проектирования:

1. Замена допусков менее жесткими, повышение шероховатости поверхности за счет учета режимов работы и характеристик установок SLM;

2. Замена геометрически сложных поверхностей деталей плоскими, цилиндрическими поверхностями;

3. Использование более экономичных с заданными физико-химическими и механическими свойствами материалами, позволяющими моделировать структуру получаемых твердых изделий;

4. Применять более эффективные и экономичные технологии изготовления, постобработки и контроля качества изделий.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования предлагают структурированный подход и практический инструментарий оценки технологичности конструкции аддитивных деталей с помощью системы групповых показателей. В частности, разработаны показатели, оценивающие геометрическую сложность изделия, рациональное использование материала, необходимость и объемы постобработки для доведения степени шероховатости поверхности до назначенных в конструкторской документации значений, автоматизированного удаления поддерживающих элементов и порошка путем продувки, чистки и вакуумной сушки.

В перспективе существует значительный потенциал для расширения этой работы путем включения таких дополнительных важных показателей, как скорость изготовления детали, трудоемкость выполнения основной и постобработки, технологическая себестоимость, изучение влияния серийности на себестоимость изготовления аддитивных деталей. Такие исследования будут иметь практическое значение для удовлетворения растущего спроса на сложные детали в сфере аддитивного производства, где точность, эффективность и масштабируемость постоянно развиваются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыганцова А.Л. Направление аддитивных технологий в компании «Лазеры и аппаратура» // Аддитивные технологии. 2025. № 2. С. 8–12.

2. Lianos A.K., Koutsoukos S., Bikas H., Stavropoulos P. Manufacturability assessment and design for additive manufacturing // Procedia CIRP. 2020. V. 91. P. 290–294. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.178>.

3. Carrozza A., Bircher B.A., Aversa A., Biamino S. Investigating complex geometrical features in LPBF-produced parts: a material-based comparison between different titanium alloys // Metals and Materials International. 2023. V. 29. P. 3697–3714. <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01460-4>.

4. Ding L., Tan S., Chen W. Manufacturability analysis of extremely fine porous structures for selective laser melting process of Ti6Al4V alloy // Rapid Prototyping

Journal. 2021. V. 27. P. 1523–1537. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0280>.

5. Zhang Y., Yang S., Zhao Y.F. Manufacturability analysis of metal laser-based powder bed fusion additive manufacturing – a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 110. P. 57–78. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05825-6>.

6. Курсевич Е.А., Абраменко Ю.С. Технологичность конструкций изделий, получаемых методом аддитивных технологий // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2025. № 1 (163). С. 33–37. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-1-33-37>.

7. Коробов К.С., Рипецкий А.В. Методика оценки времени синтеза изделий по технологии селективного лазерного сплавления // *Технологии аддитивного производства*. 2025. Т. 3. № 1. С. 22–34.

8. Deep A., Miri Beidokhti M., Piili H. Preliminary manufacturability evaluation of complex geometrical parts based on layer thickness in the metal powder bed fusion process // *Progress in Additive Manufacturing*. 16 June 2025. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01202-5>.

9. Таблица коэффициентов использования материала заготовок // *Inner Engineering*: [сайт]. 2025. URL: https://inner.su/articles/tablitza-koeffitsientov-ispolzovaniya-materiala-zagotovok/?sphrase_id=7733

10. Buchbinder D., Schleifenbaum H., Heidrich S., Meiners W., Bültmann J. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts // *Physics Procedia*. 2011. V. 12. P. 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.035>.

11. Разносчиков А.С., Жданов А.В., Беляев Л.В. Конструкторско-технологическая подготовка процесса селективного лазерного плавления корпусных деталей // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2024. № 12. С. 246–250.

REFERENCES

1. Tsygantsova A.L. The direction of additive technologies in the company «Lasers and equipment» // *Additive technologies*. 2025, no. 2. pp. 8–12.

2. Lianos A.K., Koutsoukos S., Bikas H., Stavropoulos P. Manufacturability assessment and design

for additive manufacturing // *Procedia CIRP*. 2020. V. 91. P. 290–294. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.178>.

3. Carrozza A., Bircher B.A., Aversa A., Biamino S. Investigating complex geometrical features in LPBF-produced parts: a material-based comparison between different titanium alloys // *Metals and Materials International*. 2023. V. 29. P. 3697–3714. <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01460-4>.

4. Ding L., Tan S., Chen W. Manufacturability analysis of extremely fine porous structures for selective laser melting process of Ti6Al4V alloy // *Rapid Prototyping Journal*. 2021. V. 27. P. 1523–1537. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0280>.

5. Zhang Y., Yang S., Zhao Y.F. Manufacturability analysis of metal laser-based powder bed fusion additive manufacturing – a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 110. P. 57–78. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05825-6>.

6. Kursevich E.A., Abramenko Yu.S. Workability of industrial products obtained by fully additive technologies // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2025, no. 1 (163), pp. 33–37. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-1-33-37>.

7. Korobov K.S., Ripetsky A.V. Methodology for estimating the build time of parts manufactured using the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) technology // *Additive manufacturing technologies*. 2025, vol. 3, no. 1. pp. 22–34.

8. Deep A., Miri Beidokhti M., Piili H. Preliminary manufacturability evaluation of complex geometrical parts based on layer thickness in the metal powder bed fusion process // *Progress in Additive Manufacturing*. 16 June 2025. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01202-5>.

9. Table of coefficients for the use of work material // *Inner Engineering*: [website]. 2025. URL: https://inner.su/articles/tablitza-koeffitsientov-ispolzovaniya-materiala-zagotovok/?sphrase_id=7733

10. Buchbinder D., Schleifenbaum H., Heidrich S., Meiners W., Bültmann J. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts // *Physics Procedia*. 2011. V. 12. P. 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.035>.

11. Raznoschikov A.S., Zhdanov A.V., Belyaev L.V. Design and technological preparation of selective laser melting operation for structures // *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2024, no. 12, pp. 246–250.

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 28.07.2025; approved after reviewing 17.09.2025; accepted for publication 29.09.2025.