

Статистическое исследование шероховатости поверхности изделий из Ti-6Al-4V, построенных методом селективного электронно-лучевого плавления

Е. В. Краснова, Ю.А. Моргунов*, Б. П. Саушкин

Московский политехнический университет,
г. Москва, Российская Федерация
*e-mail: morgunov56@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2022

После доработки 15.11.2022

Принята к публикации 21.11.2022

Приведены результаты статистического исследования параметров микрогеометрии поверхности вертикальных стенок объекта построения при аддитивном формообразовании методом электронно-лучевого плавления, выполнена оценка влияния условий построения и параметров режима штриховки на шероховатость поверхности. Установлено воздействие параметров режима штриховки на шероховатость боковой поверхности при построении образцов с вертикальными стенками. Показано, что значение среднего размера высоты неровностей R_z увеличивается по мере интенсификации энергетического режима штриховки. Предложена физическая модель, описывающая влияние режима штриховки на шероховатость вертикальных стенок, основанная на гипотезе о возможности проникновения микропотока расплава при штриховке на внешнюю поверхность контура. Показано, что распределение значений шероховатости поверхности вертикальных стенок имеет негауссов характер, а у кривых, как правило, отмечена правая асимметрия (мода расположена левее центра группирования размеров), что указывает на влияние неслучайных факторов, число или значения которых систематически изменяются во времени.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронно-лучевое плавление, шероховатость вертикальных стенок, изделия из титановых сплавов

УДК 621.7

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.6.01>

ВВЕДЕНИЕ

Технологии селективного электронно-лучевого плавления (electron beam melting – EBM), созданные около 25 лет тому назад, быстро развиваются и совершенствуются. Расширяется сфера их эффективного применения в наукоемких отраслях промышленности, таких как авиационная и ракетно-космическая. Об этом свидетельствует рост числа публикаций по электронно-лучевому аддитивному производству изделий из металлов и сплавов [1–7], создание за два десятилетия рынка технологического оборудования и технологических услуг [7–9].

Большинство опубликованных работ посвящено исследованию микрометаллургических процессов, протекающих в зоне контакта пучка электронов с материалом [10, 11] и связанных с ними структурно-фазовых изменений в материале, формированию и оценке его физико-механических свойств [12–14]. Однако технологические характеристики производства изделий данным методом, такие как точность формообразования, качество поверхностного слоя, трудо-

емкость и себестоимость, а также влияние на них параметров режима изучены недостаточно [15–17]. Важным направлением в этой области исследований является анализ метрологических проблем измерения показателей точности и качества поверхностного слоя [18, 19]. Такой анализ в области аддитивных процессов изготовления металлических компонентов проведен в [19]. Рассмотрены существующие технологии, стандарты, методы и средства оценки точности и шероховатости изделий. Подчеркнута необходимость дальнейших исследований в этой области, имеющих первостепенное значение для развития технологий изготовления наукоемких изделий современного производства с высокими требованиями к качеству изготовления.

В ряде работ [15, 20–22] отмечается, что высокая шероховатость поверхности построения является существенным недостатком технологии EBM, определяющим ее конкурентоспособность и сужающим сферу эффективного промышленного применения. Во-первых, высокая шероховатость поверхности рассматривается как

возможная причина снижения усталостной прочности изделий, построенных по указанным технологиям, из-за появления концентраторов напряжения в виде глубоких и узких впадин [23, 24]. Во-вторых, этот фактор предопределяет дополнительную обработку изделия для получения поверхностей высокой точности. Значительный объем такой доработки удорожает производство и лишает аддитивную технологию одного из важнейших преимуществ – возможности получения готового товарного продукта [17, 25]. Отметим также влияние шероховатости на снижение конкурентоспособности ЕВМ по отношению к технологии селективного лазерного плавления (*SLM*). Так, в [26] указаны типичные значения $Ra = 11$ мкм и $Ra = 25\text{--}35$ мкм для изделий из Ti-6Al-4V, полученных *SLM* и ЕВМ соответственно.

Более высокая шероховатость поверхности при ЕВМ по отношению к *SLM* объясняется относительно крупными размерами частиц используемого порошка, большей толщиной единичного слоя, большей плотностью вводимой энергии и другими факторами [22, 26]. Отмечается формирование волнистости на горизонтальных поверхностях, порождаемой наложением (перекрытием) соседних валиков наплавки, которая значительно более выражена в случае ЕВМ. Наблюдается присутствие на них частично оплавленных частиц порошка. Подобный характер морфологии поверхности отмечается и в других работах [15].

На боковой поверхности образцов, полученных методом ЕВМ, волнистость трудно идентифицировать из-за большого количества частиц порошка, связанных с истинной поверхностью, из-за частичного оплавления этих частиц или спекания. Этот эффект характерен для ЕВМ, поскольку каждый слой порошка перед оплавлением площадки построения предварительно спекается. Как следствие высокая шероховатость поверхности и дополнительные затраты на очистку поверхности изделий от частиц порошка.

При анализе шероховатости наклонных или криволинейных поверхностей во многих работах отмечается роль толщины и геометрии слоя [20, 27]. Такое влияние часто называют эффектом лестничной ступени, который характерен для всех видов послойного изготовления изделий и является причиной отклонения вида реальной поверхности от номинальной. При малой толщине слоя такие отклонения формируют микрогеометрию поверхности, при большой толщине их рассматривают как отклонение формы поверхности.

На шероховатость вертикальных и наклонных поверхностей заметное влияние оказывает тот факт, что при плавлении металлических порошков ванна расплава на границе области построения не может обеспечить равномерное спекание и сплавление порошка. Как результат, отдельные частицы не полностью расположены в пределах переплавленного слоя и связаны с ним шейками-перемычками, форма и размеры которых зависят от размеров частиц, теплофизических свойств материала и параметров режима построения граничных участков отдельного слоя. Кроме того, большой объем расплава в ванне при построении контура может привести к движению жидкости под действием гравитационной силы и поверхностного натяжения и образованию наплыва на боковой поверхности [22].

В [22] получено, что направление построения влияет на величину шероховатости: верхние участки построения менее шероховатые, чем нижние. Авторы отмечают, что в зависимости от условий и параметров режима построения шероховатость поверхности при ЕВМ может изменяться в широких пределах $Ra = 20\text{--}50$ мкм, а в проведенных ими экспериментах поле рассеяния значений шероховатости сужено до $Ra = 24\text{--}30$ мкм. В [26] указан диапазон достигаемой шероховатости 30–36 мкм.

Отмечается влияние направления измерения шероховатости на ее величину. Так, в [26] при измерениях вдоль направления построения параметр шероховатости выше, чем поперек, на 20–30%.

В работах [22, 26, 28] исследовано влияние условий и параметров построения контура слоя на величину шероховатости боковой стенки объекта построения.

В [26] представлены результаты систематических исследований микрогеометрии поверхности образцов из сплава Ti-6Al-4V сечением 5×50 мм и высотой 50 мм, построенных на машине Arcam A2X с учетом заложенных в нее возможностей и условий построения. На этапе плавления деталь строилась в два этапа. На первом – создавалась внешняя граница (контур построения данного слоя). Затем внутриконтурная площадь каждого сечения заполнялась растровым перемещением луча (штриховка). Предполагается, что построение контура определяет шероховатость формируемой внешней поверхности изделия.

Использованы и изучены два типа контурных стратегий: обработка контура непрерывным пучком электронов (1) и многоточечная контурная обработка (2), известная как Multibeam. Для первой стратегии переменные параметры – ток контурного луча, смещение

фокуса луча и функция скорости сканирования, а для второй – количество точек, время формирования ванны расплава, коэффициент перекрытия пятен, ток пучка и смещение его фокуса.

При обеих стратегиях контурного сканирования было получено некоторое улучшение шероховатости поверхности за счет оптимизации параметров режима. Установлено, что при оптимизированных параметрах стратегия сканирования (1) дает более низкое значение шероховатости поверхности и худшую геометрическую точность, чем мультиточечная стратегия (2). Отмечается, что поля рассеяния значений параметра шероховатости, измеренных по вертикальному (в направлении построения) и по горизонтальному направлениям для образцов, полученных на различных режимах, по стратегии (1) смещаются (соответственно $Ra = 24,1\text{--}39,3$ мкм и $Ra = 19,7\text{--}31,2$ мкм) [26]. Образцы, построенные по стратегии (2), характеризуются значением шероховатости поверхности $Ra = 26,1\text{--}40,5$ мкм по вертикальному и $Ra = 25,5\text{--}33,5$ мкм по горизонтальному направлениям. Сделан вывод о том, что возможности регулирования параметра шероховатости за счет параметров режима ограничены в обоих случаях.

При реализации стратегии (2) количество точек плавления наиболее заметно влияет на изменение шероховатости [26]. Отмечено также влияние таких параметров, как время экспозиции и коэффициент перекрытия пятен. Лучшие результаты были достигнуты в экспериментах с числом пятен более 40, временем экспозиции 0,4 мс и перекрытием 0,6 мм, при токе луча 4 мА. Ток луча и смещение фокуса оказали незначительное влияние на шероховатость поверхности, так как количество энергии, передаваемой от луча к порошку, было относительно небольшим, и преобладающее влияние на шероховатость поверхности оказывали другие параметры. Авторы отмечают, что технологическое окно для улучшения шероховатости поверхности невелико и изменение только параметров обработки не оказывает значительного влияния на значения шероховатости. Аналогичный вывод вытекает из результатов работ [29, 30].

В [28] установлено сильное влияние числа треков, формирующих контур, на шероховатость поверхности и количество дефектов в поверхностном слое (стратегия 1). При использовании одного трека отмечается возможность снижения параметров Rz на 12% и Ra на 32% за счет оптимизации параметров режима по отношению к параметрам, рекомендованным компанией Arcam. При двухтрековом построении контура (внешний и внутренний контуры) по отношению к однострековому второй трек позволяет

несколько компенсировать высокую шероховатость, возникающую при штриховке, и снизить количество дефектов в поверхностном слое. Автор отмечает корреляционную зависимость размеров ванны расплава с подводимой энергией и указывает на то, что глубина ванны может составлять 2–8 толщин переплавляемых слоев (145–619 мкм при толщине слоя 75 мкм). Показано, что образцы с меньшей шероховатостью обладают также меньшей пористостью.

В [29] показано, что возрастание тепловыделения, вызванное либо увеличением тока электронного пучка, либо уменьшением скорости сканирования или смещением фокуса электронного пучка, может привести к ухудшению качества материала и повышению шероховатости поверхности деталей из Ti-6Al-4V. В качестве обобщенного параметра в работе рассматривается линейная плотность энергии, w (Дж/м), равная отношению мощности пучка электронов к скорости перемещения пятна контакта пучка с поверхностью.

Рекомендуется выбирать рабочие параметры режима таким образом, чтобы они лежали в диапазоне линейной плотности энергии 100–300 Дж/м.

В [20, 21, 27] сделан более общий вывод о том, что любой параметр, влияющий на количество тепла, доступное для частичного плавления порошка, может влиять на шероховатость поверхности. Авторами работы [21] исследовался вопрос о влиянии расположения изделий в области построения на шероховатость поверхности. Установлено, что накапливание тепла между тонкими пластинами с малым расстоянием между ними увеличивает вероятность плавления какого-то количества частиц порошка и их закрепления вблизи затвердевшей поверхности.

Таким образом, влияние параметров формирования контура изделий на шероховатость поверхности исследовалось в ряде работ. При этом режим штриховки оставался неизменным, и высказывалась гипотеза о том, что стадия штриховки не влияет на микрогеометрию поверхности. Вместе с тем из рассмотренных работ следует, что любой параметр, влияющий на количество тепла, доступного для частичного плавления порошка, может влиять на шероховатость поверхности. Учитывая относительно небольшую ширину контурного слоя (~ 1 мм) и высокую интенсивность нагрева материала при штриховке, влияние этого источника тепла на формирование микрогеометрии наружного слоя требует дополнительного изучения. Кроме того, статистический анализ результатов измерения шероховатости представляет самостоятельный интерес.

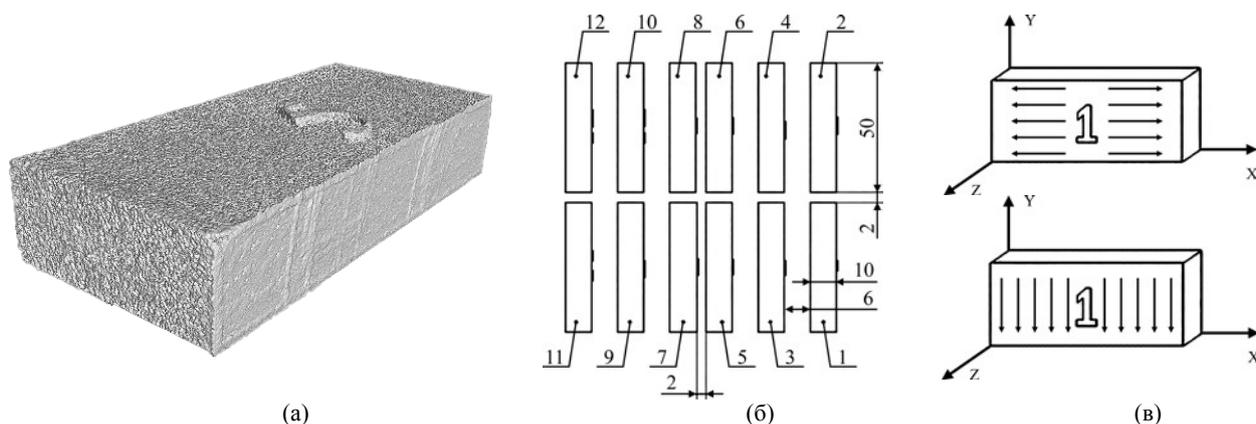


Рис. 1. Общий вид построенного образца (а), расположение образцов на платформе построения (б) и схема измерения шероховатости боковой лицевой стенки (в).

Таблица 1. Параметры режимов формирования контура

Параметры	Внешний	Внутренний 1	Внутренний 2
Ток, мА	5	10,2	10,2
Скорость перемещения фокусного пятна, мм/с	440	800	800
Смещение фокуса, мА	6	6	6
Смещение линии, мм	0,29	0,17	0,17

Таблица 2. Изменяемые параметры режима штриховки

Параметр	Режимы			
	I (8–10–12)	II (1–3–5)	III (7–9–11)	IV (2–4–6)
Сила тока, I , мА	5	10	15	20
Скорость сканирования, v_n , мм/с	1000	3000	5000	4350
Смещение треков при штриховке, s , мм	0,5	0,7	1,0	0,2
Линейная плотность энергии, w , Дж/м	300	200	180	275
Плотность энергии, u , Дж/мм ²	0,60	0,28	0,18	1,38

Примечания: В круглых скобках номера соответствующих образцов.
Постоянные параметры: смещение фокуса – 25 мА, функция скорости – 45.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

При выполнении экспериментальных работ на различных режимах изготавливали образцы длиной 50 мм, высотой 35 мм и шириной 10 мм (рис. 1а) из порошков сферической формы из материала Ti-6Al-4V с диапазоном изменения размеров 44–106 мкм. Расположение образцов на платформе построения показано на рис. 1б.

Химический состав порошков, по данным спектрографических измерений, несколько отличается от ГОСТа 19807-91 (ASTM F2924) в отношении сплава VT6с, в частности, отмечается повышенное содержание углерода в порошках (0,2–0,4%).

Образцы изготавливали на установке Arcam 2X с применением стандартных процедур. Контур каждого сечения формировался в три прохода с перекрытием треков (табл. 1).

Использовалась стратегия многоточечной контурной обработки (Multibeam). Условия обработки: толщина слоя порошка – 50 мкм, ускоряющее напряжение – 60 кВ. Размеры стартовой пластины из коррозионностойкой стали 235×235×10 мм.

На каждом из четырех использованных режимов штриховки, изменяемые параметры которых приведены в табл. 2, обрабатывали по три образца. Основной режим (IV) соответствует рекомендациям производителя оборудования. Для оценки энергетических возможностей выбранных режимов штриховки рассчитывали значения параметров w (Дж/м) и u (Дж/мм²). Параметр $w = IU/v_c$ характеризует энергию, подводимую к поверхности и отнесенную к единице длины трека. Его величина соответствует рекомендациям [29], что обеспечивает невысокую пористость и относительно однородную поверхность образца. Параметр $u = w/f$ косвенно учитывает вклад энергии, запасенной в переплавленном объеме i -го трека, в процесс теплопереноса в $(i + 1)$ треке [31].

Построение образцов осуществляли при использовании следующей стратегии: предварительный нагрев до температуры 650–700 °С, три прохода построения контура с использованием системы «Multibeam» (табл. 1), штриховка со смещением осей треков, указанным в табл. 2. При переходе от слоя к слою направление штриховки изменялось на 90°.

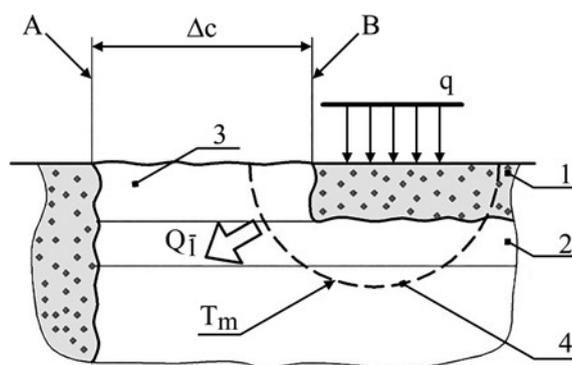


Рис. 2. Схема поперечного сечения контура при штриховке: 1 – сплавленный слой; 2 – переплавленный слой; 3 – область контура; 4 – условная граница расплава.

Таблица 3. Характеристики распределения шероховатости при построении образцов по режиму 2

Объект статистики	n	Rz_{cp} , мкм	Rz_{min} , мкм	Rz_{max} , мкм	ω , мкм	σ , мкм
Обобщенные данные	150	205	157	292	135	32,75
Измерения вдоль оси X	75	194	157	267	110	24,1
Измерения вдоль оси Y	75	216	159	292	160	36,5
Образец 1 вдоль оси X	25	223,5	180	267	87	21,4
Образец 3 вдоль оси X	25	186,5	161	212	51	14,3
Образец 5 вдоль оси X	25	181	157	205	48	16,0
Образец 1 вдоль оси Y	25	257	225	292	94	25,2
Образец 3 вдоль оси Y	25	200	160	234	74	18,3
Образец 5 вдоль оси Y	25	191	159	234	75	21,4

Постобработка заключалась в пневмоабразивной очистке образцов от спеченной порошковой среды и отделении их от плиты.

Измерения шероховатости поверхности производили на профилометре модели 130 ОАО «Завод ПРОТОНМИЭТ» (радиус измерительного наконечника 8 ± 3 мкм) с последующим анализом профилограмм. На каждом образце производились измерения шероховатости по схемам, показанным на рис.1в и выполнялась статистическая обработка результатов. При исследовании морфологии поверхности использовались оптический (OLIMPUS BX51M) и электронный (Phenom G2 ProX) микроскопы. Химический состав изучали с помощью интегрированной в микроскоп системы энергодисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гипотетическую модель, поясняющую возможное влияние параметров режима штриховки на шероховатость боковой поверхности построенных образцов, можно представить, пользуясь упрощенной схемой поперечного сечения контура (рис. 2).

Контур представлен в виде металлической перегородки в пористой порошковой среде, ограниченной поверхностями раздела A и B и соединенной с предыдущим переплавленным слоем. Толщина контура Δ_c зависит от параметров режима построения. При штриховке

вблизи внутренней границы контура создается мощный тепловой источник с плотностью потока мощности q , пространственные и временные характеристики которого определяются стратегией и параметрами режима этого этапа построения слоя, прежде всего силой тока пучка, скоростью его перемещения и смещением треков штриховки [22, 28]. В [1] рассмотрена динамика изменения температуры в фиксированной точке поверхности построения и показано, что после окончательного затвердевания (материал расплавляется несколько раз) температура все еще сильно колеблется из-за плавления соседних треков и последующих слоев. В [28] глубина ванны расплава оценивается, как 2–8 значений высоты порошковой среды. По этой причине рядом с плоскостью построения температура может неоднократно превышать значения температуры плавления T_m . Поскольку отвод части тепла от ванны перегретого расплава Q_1 осуществляется в контурную перегородку, происходят ее частичное переплавление на некоторую глубину в направлении, перпендикулярном построению, и соответствующий нагрев наружной поверхности A. Этому способствует специфический профиль выделяемой энергии по глубине при взаимодействии электронного пучка с металлом из-за упругого рассеяния электронов [32].

Основываясь на сказанном, можно выделить некоторые механизмы, способные изменить в той или иной степени шероховатость наружной

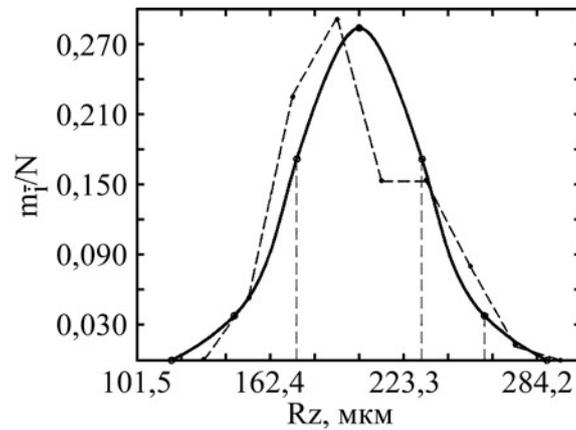


Рис. 3. Практическое и нормальное распределения значений Rz по результатам 150 измерений образцов 13–5, построенных на режиме II.

поверхности. Так, повышение температуры наружной поверхности способствует адгезии частиц порошка и спеканию его со стенкой [21]. Этому содействует также температурное расширение металла и соответствующее смещение внешней границы перегородки в сторону пористой среды.

Кроме того, в металле перегородки возникают термоупругие деформации, которые при определенных условиях могут перейти в термопластические. Нельзя исключить также возможность сквозного локального проплавления перегородки. Действительно, как будет показано далее, величина R_{\max} может достигать значений 250–300 мкм и более. Это означает, что в перегородке имеются локальные места, эффективная ширина которых существенно меньше среднего значения.

При построении образцов формирование контура осуществлялось на одном режиме, а режимы штриховки изменялись. После остывания камеры и постобработки производились измерения шероховатости боковой поверхности образца, причем шероховатость измерялась как в горизонтальном (по оси X), так и в вертикальном (по оси Y) направлениях относительно поверхности опорной плиты (рис. 1в). В окрестностях случайно выбранной точки производились измерения шероховатости, по результатам которых строились практические кривые распределения и определялись их параметры.

Подробный анализ параметров распределения производился при обмере образцов 1–3–5, обработанных по режиму II (табл. 3). Проведено по 25 измерений на каждом образце по осям X и Y .

Полученные гистограммы имеют, как правило, правую асимметрию, то есть центр группирования значений шероховатости смещен в сторону меньших значений шероховатости по отношению к середине поля рассеяния.

Асимметрия характерна для суммарных гистограмм распределения значений шероховатости для образцов 1, 3 и 5, при измерениях, как по оси X , так и Y , а также для гистограммы, построенной по всем проведенным измерениям.

Распределение параметра Rz шероховатости поверхности при 150 измерениях в произвольно расположенных точках боковой поверхности стенки образцов 1–3–5 показано на рис. 3 (коэффициент асимметрии равен 0,15). Там же показано нормальное распределение, построенное по рассчитанному значению среднеквадратичного отклонения σ_p . Расчет критерия Пирсона подтвердил, что при доверительной вероятности 0,95 различие между эмпирическим и нормальным распределениями имеет статистически значимый (неслучайный) характер.

Негауссовы законы распределения случайной величины X_t , образованной по схеме суммы большого числа слагаемых, называются распределениями с функцией $a(t)$, если, кроме независимых или слабо зависимых случайных слагаемых Y_t^i , подчиненных условиям Ляпунова, в правой части формулы суммирования имеется сумма $C_t = \sum_s C_t^s$ неслучайных слагаемых C_t^s , число или значения которых систематически изменяются во времени, то есть если

$$X_t = \sum_{i=1}^n Y_t^i + C_t. \quad (1)$$

Распределение величины X для момента времени t подчиняется закону Гаусса:

$$\varphi_t(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - a_0 - C_t)^2}{2\sigma_0^2}\right), \quad (2)$$

где a_0 и σ_0 – параметры гауссова распределения для суммы случайных слагаемых.

Закон распределения значений x величины X для промежутка времени $[t_0, t_k]$ представляется в этом случае в виде:

Таблица 4. Результаты измерения шероховатости на лицевой (Л) и обратной (О) гранях в нижней (Н) и верхней (В) областях по высоте образцов 5 и 6

Место измерения	Rz_{cp} , мкм	σ_{Rz} , мкм ⁻¹	Ra_{cp} , мкм	σ_{Ra} , мкм ⁻¹	Место измерения	Rz_{cp} , мкм	σ_{Rz} , мкм ⁻¹	Ra_{cp} , мкм	σ_{Ra} , мкм ⁻¹
5ЛН	182,3	20,4	36,4	4,8	5ОН	148,2	16,2	25,9	3,3
5ЛВ	185,6	16,7	34,6	4,0	5ОВ	172,1	14,7	33,4	2,9
6ЛН	173,5	13,3	32,9	4,2	6ОН	149,2	12,7	26,5	3,4
6ЛВ	194,3	17,1	36,1	4,7	6ОВ	194,3	15,8	37,9	4,2

$$\varphi_{\Sigma}(x) = \frac{1}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{(x - a_0 - a(t))^2}{2\sigma_0^2}\right), \quad (3)$$

где $a(t)$ – функция, характеризующая изменение величины C_t в указанном промежутке времени.

В большинстве технических приложений функция $a(t)$ представляется в виде степенной функции:

$$a(t) = a_0 + 2l_a t^{\frac{1}{n}} = a_0 + 2\lambda_a \sigma_0 t^{\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

где $l_a = \frac{a(t)_{наиб} - a(t)_{наим}}{2}$ – половина величины

изменения функции $a(t)$ за рассматриваемый промежуток времени, $\lambda_a = l_a / \sigma_0$, σ_0 – параметр мгновенного гауссова распределения. Степень при t может быть целой или дробной.

Рассматривают три возможных случая:

1. При $n = 1$ $a(t) = a_0 + 2l_a t$, что означает равномерное изменение во времени доминирующего неслучайного фактора. Все кривые распределения плотности вероятности этого семейства симметричны и имеют плоские вершины, а закон распределения случайной величины является композицией гауссова распределения и распределения по закону равной вероятности.

При $n \neq 1$ получаем замедленное или ускоренное смещение центра группирования.

2. При $n > 1$ степень при t больше единицы, функция $a(t)$ вогнутая.

3. При $n < 1$ степень при t меньше единицы, функция $a(t)$ выпуклая.

Случай 2 относится к семейству распределений с правой асимметрией (мода расположена левее центра группирования размеров), а случай 3 – к семейству распределений с левой асимметрией (мода расположена правее центра группирования размеров).

Таким образом, полученные экспериментально асимметричные законы распределения указывают на то, что на процесс формирования шероховатости поверхности при построении вертикальных стенок методом ЕВМ, помимо случайных факторов, влияют факторы система-

тические. Выделим возможные систематически изменяющиеся факторы.

1. Анализ данных табл. 3 указывает на неизотропность значений шероховатости, измеренных по осям X и Y относительно направления измерения, что подтверждают данные работ [22, 26]. При случайном выборе направления измерения этот фактор можно рассматривать как систематический.

2. Систематический фактор может быть связан с изменениями условий отвода тепловой энергии с увеличением высоты построения. В работе [22] отмечается, что это приводит к нагреву поверхности до более высоких температур и повышенной адгезии маломерных частиц порошка. Для проверки сделанного предположения были проведены измерения шероховатости по оси X в нижней и верхней зонах образцов, расположенных на расстоянии 25–30 мм друг от друга по направлению построения (табл. 4).

Согласно рис. 16 образцы 5 и 6 расположены так, что лицевая и обратная грани находятся в различных условиях теплоотвода, так как расстояния от них до соседних образцов различны (6 и 2 мм соответственно). Кроме того, эти образцы строятся при заметно отличающихся характеристиках плотности потока энергии u (0,28 и 1,38 Дж/мм² соответственно, табл. 2). Эти обстоятельства позволяют объяснить полученные результаты. Изменение шероховатости поверхности 5Л по высоте образца незначительны, однако для поверхности 6Л повышение шероховатости по высоте образца становится заметным и составляет по Rz и Ra соответственно 12 и 9,7%. Еще в большей степени обсуждаемый эффект заметен на поверхностях 5О (16 и 29%) и 6О (30 и 43%).

Анализ микрофотографий поверхности построенных образцов (рис. 4) позволяет предположить, что одной из возможных причин наблюдаемого эффекта является движение микропотоков расплава к периферии объекта построения, вероятность появления которых тем выше, чем выше температура твердофазной поверхности и ниже вязкость жидкой фазы.

Контактируя с порошком, расплав проникает в поры между частицами, остывает, передавая им тепловую энергию, что приводит к их

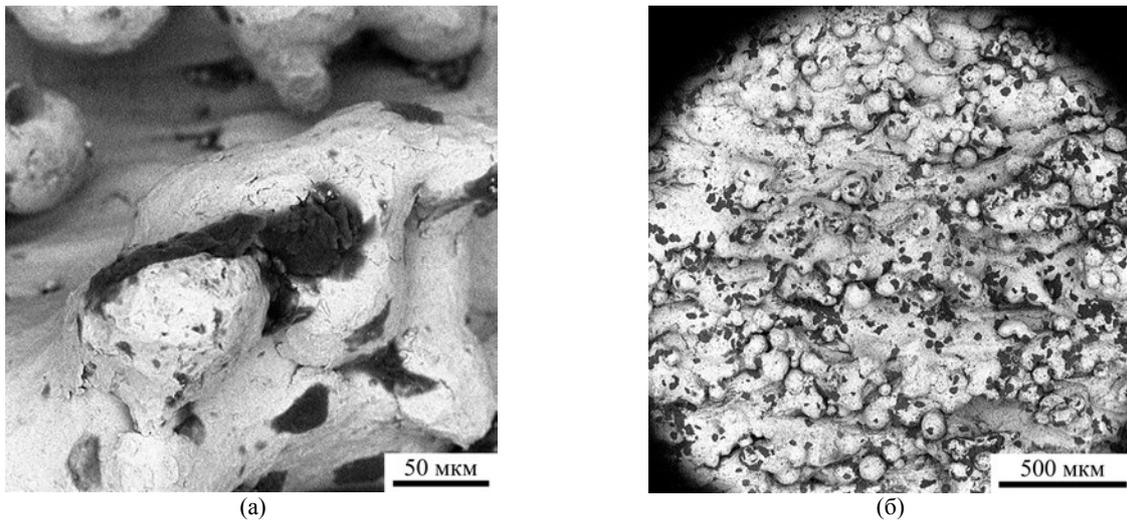


Рис. 4. Электронные микрофотографии боковой поверхности образца 1 при различном увеличении.

частичному оплавлению. При этом образуются конгломераты частиц, формирующие микровыступы высотой в несколько средних диаметров частиц (рис. 4б). Этот механизм, очевидно, связан с условиями теплоотвода из слоя построения и интенсивностью ввода энергии в порошок слой.

Конгломераты частиц распределены случайным образом на поверхности стенки. При этом, как видно из рис. 4а (направление построения снизу вверх), некоторые горизонтальные участки поверхности формируются слоями с относительно регулярной границей, без присутствия конгломератов и адгезии относительно крупных частиц. По-видимому, это одна из причин различия значений шероховатости, измеренных в горизонтальном и вертикальном направлениях.

3. Приведенные выше данные табл. 4 указывают на сильное влияние расположения образца на платформе построения. Стенка образца с большим расстоянием до соседнего образца (6 мм) при прочих равных условиях заметно отличается по параметру шероховатости от стенки с меньшим расстоянием (2 мм). Заметим, что для образца с более высоким удельным энерговодом (6) различие в расположении стенки менее заметно, чем для образца с менее высоким (5).

Рассмотрим в связи с этим статистические данные для оценки влияния параметров режима штриховки на шероховатость поверхности. На рис. 5 представлены кривые распределения шероховатости для режимов I, III, IV, а в табл. 5 – характеристики этих распределений. Все распределения характеризуются асимметрией с коэффициентами асимметрии, равными 0,2 (режим III), 0,12 (режим I) и 0,14 (режим IV).

Измерения шероховатости, проведенные в средней части короткого торца образца в направлении оси Y , показали аналогичные результаты.

Анализируя статистические данные, можно отметить следующее:

1. На всех режимах построения шероховатость поверхности, измеренная вдоль направления построения, выше, чем поперек: Rz_{cp} возрастает на 9–18% при измерении по оси Y по отношению к оси X , увеличивается поле рассеяния значений шероховатости.

2. Разброс значений параметра Rz_{min} примерно в три раза меньше, чем Rz_{max} , соответственно 10 и 34 мкм по оси X , 21 и 57 мкм по оси Y , 10 и 57 при обобщенном распределении. По-видимому, минимальные значения параметра шероховатости соответствуют участкам, микрогеометрия которых формируется преимущественно в результате металлургических превращений. Максимальные значения – участкам, на которых наблюдается некоторое количество расплавленных частиц порошка и формируются конгломераты таких частиц (рис. 4). Сказанное соответствует классификационной модели формирования микрогеометрии, изложенной в [5].

3. Как следует из данных табл. 5, параметры распределения размеров шероховатости за редким исключением увеличиваются в ряду режимов III < I < IV, что соответствует ранжированию указанных значений u : $0,18 < 0,6 < 1,38$ (Дж/мм²). Режим IV соответствует наибольшему значению энергетического параметра u , а режим III его наименьшему значению. Следует отметить, что наблюдается инверсия режимов I и II при сохранении общей тенденции к увеличению параметров микрогеометрии при усилении энергетического режима штриховки. Так, используя выражение $\sigma = pS$, связывающее среднее квадратическое σ генеральной совокуп-

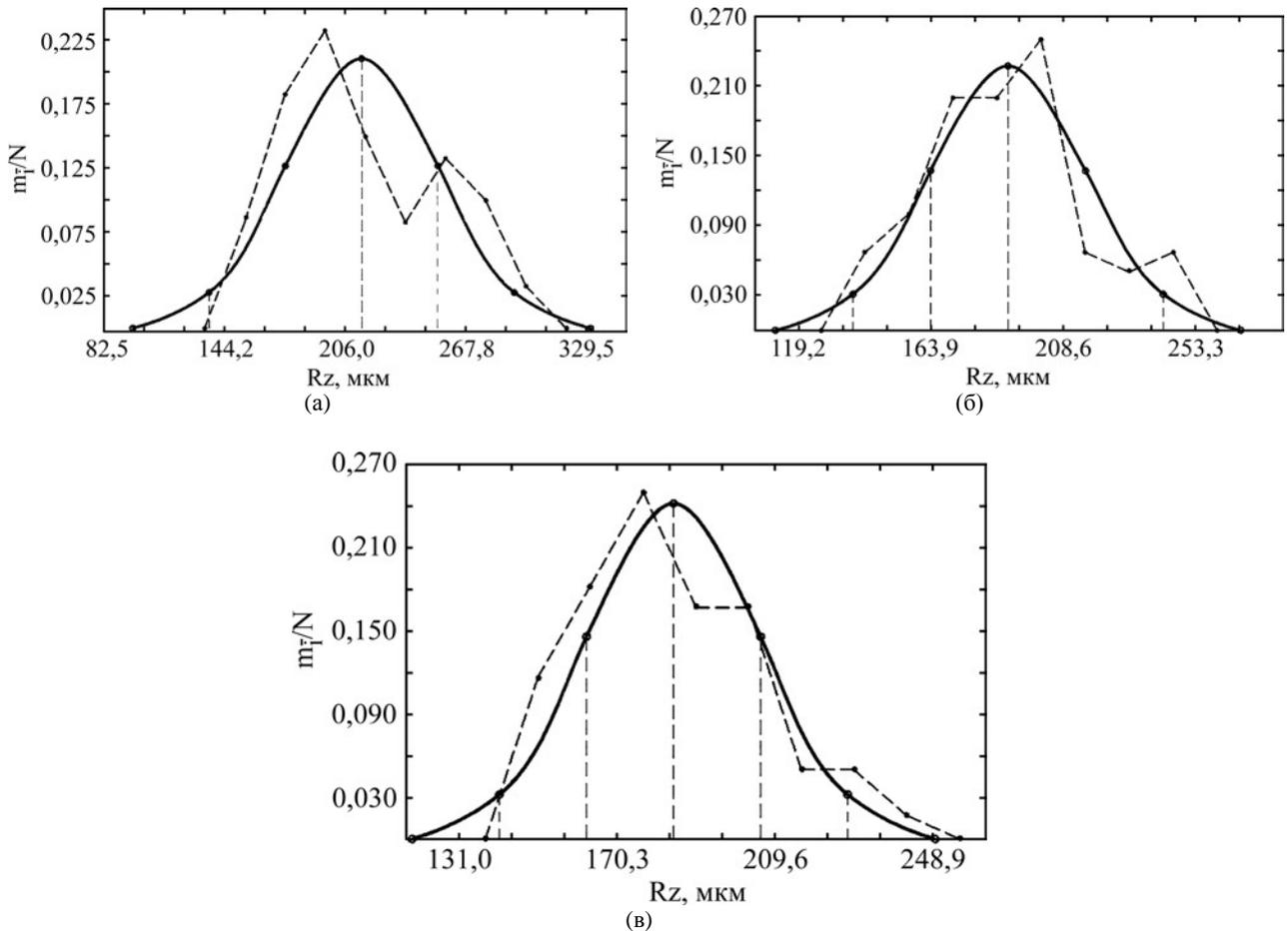


Рис. 5. Практические кривые распределения для различных режимов штриховки и соответствующие кривые нормального распределения: (а) – образцы 2–4–6, режим IV; (б) – образцы 8–10–12, режим I, (в) – образцы 7–9–11, режим III.

Таблица 5. Характеристики распределения значений шероховатости поверхности, полученных при различных режимах обработки

Параметры распределения	Режимы		
	I (8–10–12)	III (7–9–11)	IV (2–4–6)
Измерения по оси X ($n = 30$)			
Среднее значение, Rz_{cp} , мкм	179,9	177,2	199,1
Минимальное значение, Rz_{min} , мкм	143	148	153
Максимальное значение, Rz_{max} , мкм	242	234	276
Поле рассеяния, ω , мкм	99	86	123
Среднее квадратичное отклонение, σ , мкм	25,4	21,6	35,2
Измерения по оси Y ($n = 30$)			
Среднее значение, Rz_{cp} , мкм	196,9	192,0	229,9
Минимальное значение, Rz_{min} , мкм	146	167	164
Максимальное значение, Rz_{max} , мкм	247	240	297
Поле рассеяния, ω , мкм	101	73	133
Среднее квадратичное отклонение, σ , мкм	24,4	19,5	37,0
Обобщенные данные ($n = 60$)			
Среднее значение, Rz_{cp} , мкм	188,4	184,6	214,5
Минимальное значение, Rz_{min} , мкм	143	148	153
Максимальное значение, Rz_{max} , мкм	247	240	297
Поле рассеяния, ω , мкм	104	92	144
Среднее квадратичное отклонение, σ , мкм	26,2	21,7	39,0

Таблица 6. Отношение параметров Rz/Ra

Направление измерений	Образцы			
	1–3–5	2–4–6	7–9–11	8–10–12
По оси X	$5,2 \pm 0,42$	$5,0 \pm 0,54$	$5,3 \pm 0,43$	$5,2 \pm 0,42$
По оси Y	$5,2 \pm 0,38$	$5,2 \pm 0,53$	$5,4 \pm 0,39$	$5,5 \pm 0,50$
Обобщенные данные	$5,2 \pm 0,40$	$5,1 \pm 0,50$	$5,4 \pm 0,40$	$5,4 \pm 0,48$

ности с расчетной величиной S_n , для выборки размером n и принимая табличные значения поправочного коэффициента $p = 1,28$ для $n = 60$ и $p = 1,18$ для $n = 150$, получим значения среднеквадратического отклонения для режимов III, I, II и IV: соответственно 27,8; 33,5; 38,6 и 49,9. При этом значения u для режимов II и I равны соответственно 0,28 и 0,6 Дж/мм².

Анализ профилограмм поверхности указывает на то, что микрогеометрия образцов, построенных методом ЕВМ, заметно отличаются от микрогеометрии образцов, полученных обработкой лезвийным инструментом. Это приводит к изменению соотношения между высотными параметрами шероховатости таких образцов (табл. 6).

Данные табл. 6 получены статистической обработкой результатов измерений и соответствуют четырем режимам штриховки, рассмотренным выше. Видно, что отношение параметров Rz/Ra мало зависит от параметров штриховки и в общем виде описывается величиной $5,25 \pm 0,75$. Отношение Rz_{max}/Rz лежит в пределах 1,2–1,4. Полученный результат имеет практическое значение в связи с использованием различных высотных параметров шероховатости.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено влияние параметров режима штриховки на шероховатость боковой поверхности при построении образцов с вертикальными стенками. Установлено, что изменение среднего размера высоты неровностей Rz лежит в пределах 12–19% номинальной величины, причем нижнее значение характерно при измерении шероховатости в направлении горизонтальной оси, а верхнее – вертикальной.

2. Предложена физическая модель влияния параметров режима штриховки, основанная на течении микропотоков расплава под действием сил поверхностного натяжения, гравитационных сил и сил статического давления с последующим формированием на вертикальной стенке объекта построения конгломератов частиц, распределенных случайным образом.

3. Установлено, что суммарное поле рассеяния значений параметра шероховатости нескольких идентичных образцов, построенных при одних и тех же параметрах режима, заметно шире, чем поле рассеяния параметра шероховатости, полученное на каждом из них.

4. Показано, что суммарное распределение значений шероховатости описывается распределением с функцией $a(t)$, что указывает на наличие систематически изменяющихся погрешностей, обусловленных изменением шерохо-

ватости по высоте построения, неизотропностью направления измерения, положением объекта построения на стартовой пластине.

5. Установлены статистические характеристики распределения значений шероховатости поверхности в условиях данного эксперимента, что позволяет прогнозировать значения шероховатости при построении заготовок АП методом ЕВМ и обоснованно подходить к назначению припуска на обработку при доработке точных поверхностей.

6. Установлено, что для образцов, полученных методом ЕВМ, отношение $Rz/Ra = 5,25 \pm 0,75$, что заметно выше, чем при обработке поверхности лезвийным инструментом. Это соотношение позволяет обоснованно сравнивать изделия, при изготовлении которых использованы различные высотные показатели шероховатости.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korner, C., Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review, *Int. Mater. Rev.*, 2016, vol. 61, no. 5, p. 361.
2. Zhang, L.C., Liu, Y., Li, S. and Hao, Y., Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A review, *Adv. Eng. Mater.*, 2017, vol. 20, 1700842.
3. Liu, S. and Shin, Y.C., Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, *Mater. Des.*, 2019, vol. 164, 107552.
4. Morgunov, Yu.A. and Saushkin, B.P., Features of additive technologies implementation in aerospace equipment production, *SHS Web of Conferences*, 2017, 35, 01078. doi: [10.1051/shsconf/20173501078](https://doi.org/10.1051/shsconf/20173501078)
5. Краснова, Е.В., Моргунов, Ю.А., Саушкин, Б.П., Микрогеометрия поверхности изделий электронно-лучевого аддитивного производства. Селективное электронно-лучевое плавление, *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2021, № 9, с. 408.
6. Kolamroudi, M., Asmael, M., Ikan, M. and Kordani, N., Developments on electron beam melting (EBM) of Ti–6Al–4V: A Review, *Trans. Indian Inst. Met.*, 2021, vol. 74, no. 4, p. 783. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02230-9>
7. Galati, M., Electron beam melting process: a general overview, In: *Additive Manufacturing*, J. Pou, A. Riveiro, J. Paulo Davin (Eds), Elsevier, 2021, p. 277.
8. Dutta, B. and Froes, F.H., *Additive Manufacturing of Titanium Alloys. State of the Art, Challenges, and Opportunities*, Elsevier Inc., 2016, p. 84.

- doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-804782-8.00001-X>
9. *Innovations in Additive Manufacturing*, Khan, M.A., Jappes, J.T.W. (eds), Cham: Springer, 2021. 332 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_8
 10. Lu, S., Qian M., Tang H., et al., Massive transformation in Ti-6Al-4V additively manufactured by selective electron beam melting, *Acta Mater.*, 2016, vol. 104, p. 303.
 11. Scharowsky, T., Osmanlic, F., Singer, R. and Korner, C., Melt pool dynamics during selective electron beam melting, *Appl. Phys. A*, 2014, 114, p. 1303.
 12. Lewandowski, J. and Seifi, M., Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties, *Annual Rev. Mater. Res.*, 2016, vol. 46, p. 151. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032024>.
 13. Hosseini, E. and Popovich, V., A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 30, 100877. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100877>.
 14. Sun, Y.Y., Gulizia, S., Oh, C.H., Fraser, D., et al., The Influence of as-built surface conditions on mechanical properties of Ti-6Al-4V additively manufactured by selective electron beam melting, *JOM*, 2016, vol. 68, p. 791.
 15. Galati, M., Minetola, P. and Rizza, G., Surface roughness characterisation and analysis of the electron beam melting (EBM) Process, *Materials*, 2019, vol. 12, 2211.
 16. Gruber, S., Grunert, Ch., Riede, M., López E., et al., Comparison of dimensional accuracy and tolerances of powder bed based and nozzle based additive manufacturing processes, *J. Laser Appl.*, 2020, vol. 32, 032016. <https://doi.org/10.2351/7.0000115>
 17. Моргунов, Ю.А., Саушкин, Б.П., Технико-экономические аспекты аддитивного формообразования, *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2016, № 7(61), с. 28.
 18. Sidambe, A.T., Three dimensional surface topography characterization of the electron beam melted Ti6Al4V, *Met. Powder Rep.*, 2017, vol. 72, p. 200.
 19. Leach, R.K., Bourell, D., Carmignato, S., Donmez, A., et al., Geometrical metrology for metal additive manufacturing, *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, no. 2, p. 677. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.004>
 20. Strano, G., Hao, L., Everson, R. and Mand, E., Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting, *J. Mater. Process. Tech.*, 2013, vol. 213, p. 589.
 21. Jamshidinia, M. and Kovacevic, R., The influence of heat accumulation on the surface roughness in powder-bed additive manufacturing, *Surf. Topogr.:Metrol. Prop.*, 2015, vol. 3, 014003. [doi:10.1088/2051-672X/3/1/014003](https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/1/014003).
 22. Ek, R.K., Rännar, L.-E., Bäckstöm, M. and Carlsson, P., The effect of EBM process parameters upon surface roughness, *Rapid Prototyp. J.*, 2016, vol. 22, no. 3, p. 495.
 23. Vayssette, B., Saintier, N., Brugger, Ch., El May, M., et al., Numerical modelling of surface roughness effect on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V obtained by additive manufacturing, *Int. J. Fatigue*, 2019, vol. 123, p. 180. [doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.02.014](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.014).
 24. Vayssette, B., Saintier, N., Brugger, C., Elmay, M., et al., Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: effect on the high cycle fatigue life, *Proc. Eng.*, 2018, vol. 213, p. 89.
 25. Krasnova, E.V., Saushkin, B.P. and Shandrov, B.V., Preproduction engineering in additive Manufacturing. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds), *Proc. 7th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2021). Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 261. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_31
 26. Wang, P., Sin, W., Nai, M., et al., Effects of processing parameters on surface roughness of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting, *Materials*, 2017, vol. 10, p. 1121. [doi: 10.3390/ma10101121](https://doi.org/10.3390/ma10101121).
 27. Safdar, A., He, H.Z., Wei, L.-Y., Snis, A., et al., Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V, *Rapid Prototyping J.*, 2012, vol. 18, no. 5, p. 401.
 28. Schnur, Ch., *Electron beam-powder bed fusion of alloy 718: Influences of contour parameters on surface and microstructural characteristics*, Master Thesis, University West, Dept. Eng. Sci., 2019, p. 44.
 29. Kirchner, A., Klöden, B., Luft, J., Weißgärber, T., et al., Process window for electron beam melting of Ti-6Al-4V, *Powder Met.*, 2015, vol. 58, no. 4, p. 246.
 30. Lodes, M., Wachter, S., Körner, C., Processing windows for Ti-6Al-4V fabricated by selective electron beam melting with improved beam focus and different scan line spacings, *Rapid Prototyp. J.*, 2019, vol. 25, p. 665. [doi: 10.1108/RPJ-04-2018-0084](https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2018-0084).
 31. Yusuf, S.M. and Nong, G., Influence of energy density on metallurgy and properties in metal additive manufacturing, *Mater. Sci. Technol.*, 2017, vol. 33, no. 11, p. 1269.
 32. Klassen, A., Bauereib, A. and Korner, C., Modelling of electron beam absorption in complex geometries, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, vol. 47, 065307. [doi: 10.1088/0022-3727/47/6/065307](https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/6/065307).

Summary

The paper presents the results of a statistical study of the parameters of the microgeometry of the surface of the vertical walls of the construction objects during additive shaping via electron beam melting. An assessment was made of the influence of the construction conditions and the hatching mode parameters on the surface roughness. The influence of the hatching mode parameters on the roughness of the side surface, when constructing samples with vertical walls, was established. It is shown that the value of the average size of the height of the irregularities R_z increases with the intensification of the energy regime of hatching. A physical model is proposed that describes

the influence of the hatching mode on the roughness of vertical walls, based on the hypothesis of a possibility of penetration of the melt micro-flow during hatching onto the outer surface of the contour. It is shown that the distribution of the surface roughness values of the vertical walls has a non-Gaussian character, the curves are, as a rule, right asymmetric (the mode is located to the left of

the size grouping center), which indicates the influence of non-random factors, the number or values of which systematically change over time.

Keywords: additive technologies, electron beam melting, vertical wall roughness, titanium alloy products