

УДК 620.186

А.Г. Евгенов¹, С.В. Шуртаков¹, С.М. Прагер¹, Р.Ю. Малинин¹

**К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ
РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ
ОБОРОТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦИКЛИЧНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В ПРОЦЕССЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11

Проведен анализ зарубежных публикаций в части оценки влияния кратности использования порошков на уровень примесей, технологические характеристики оборотного порошка в процессе селективного лазерного сплавления (СЛС) и механические свойства синтезированных материалов. Предложено решение задачи по разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе СЛС путем автоматического соотнесения коэффициентов загрязнения с элементами, составляющими режим экспонирования каждого сечения, при расчете протяженности траектории лазера или продолжительности экспонирования всех элементов, формирующих сечение детали.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, окисленные гранулы, фракционный состав, экспонирование, лазерный синтез, контур, основной металл, поддерживающие структуры.

A.G. Evgenov¹, S.V. Shurtakov¹, S.M. Prager¹, R.Yu. Malinin¹

**ON THE DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL CALCULATION METHOD
FOR ASSESSING THE DEGRADATION OF RECYCLED METAL
POWDER MATERIALS, DEPENDING ON THE CYCLICITY
OF USE IN THE SELECTIVE LASER MELTING PROCESS**

This article analyses foreign articles on the influence of the frequency of use on the level of impurities, technological characteristics of the powder in the SLM (DMLS) process and on the mechanical properties of the synthesized materials. A solution to the problem of developing a universal calculation method for evaluating degradation in the SLM process of recycled metal powder materials has been proposed. The algorithm includes the automatic correlation of the contamination factors with the corresponding exposure mode elements of each type of cross-section (contour, upskin, downskin, core) during measurement of the longitude of the laser path or the exposure duration of all elements that form the cross-section of a part.

Keywords: selective laser melting, oxidized powder, fractional composition, exposure, laser synthesis, contour, base metal, support structures.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Появление в последнее время в открытой печати исследований в области деградации оборотного металлического порошка в процессе селективного лазерного сплавления (СЛС) связано с более широким внедрением аддитивных технологий в серийное производство и необходимостью повышения его технико-экономических показателей, а это без использования возвратного порошка невозможно. При этом вопрос деградации такого порошка и его влияния на структуру и механические

свойства синтезированного материала в зависимости от цикличности использования ранее практически не затрагивался.

Различные научные коллективы [1–5] придерживаются мнения, что актуальным является изучение деградации порошка в процессе лазерного синтеза с целью дальнейшей разработки рекомендаций по его использованию, поскольку стоимость материала может составлять от 5 до 46% стоимости каждого процесса синтеза. Исследованию механических свойств и структуры синтезированных

материалов посвящен большой объем открытых публикаций, в том числе достаточно подробно изучены фазовый состав и структура отечественных материалов для процесса СЛС [6–16]. Однако относительно немного работ посвящено изучению рециркуляции порошка, а имеющиеся разрозненные данные нуждаются в осмыслении и систематизации для выбора направлений исследований по данному вопросу. Анализ имеющихся научно-технических литературных данных показывает, что проведенные работы не имеют системного характера, а предложенные авторами методики или несовершенны, или вообще не зафиксированы в исследовании, что не позволяет сделать однозначных выводов по деградации оборотного порошка в процессе СЛС.

В данной работе авторами предпринята попытка детально проанализировать имеющийся объем информации по этому вопросу и предложить общую концепцию по оценке влияния параметров синтеза и геометрической формы синтезируемой детали(ей) на загрязнение оборотного порошкового материала газовыми примесями.

В настоящее время применение аддитивных технологий для изготовления серийных деталей ГТД и ГТУ требует разработки универсальной достоверной методики определения степени деградации оборотных порошков и механических характеристик синтезированного материала в процессе СЛС, что делает данное исследование крайне актуальным.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.4. «Технологии получения би- и полиметаллических естественноармированных металлических материалов методом прямого лазерного синтеза из металлических порошков» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [17].

Материалы и методы

В процессе СЛС при экспонировании сечения электронной модели движение лазера происходит по определенному алгоритму в пределах актуального сечения. Отдельные элементы сечения экспонируются с различным энергетическим воздействием, что необходимо для обеспечения в каждом случае конкретных требований. Так, при штриховке по режиму экспонирования основного металла (массивная часть образца/детали) оптимальные энергоскоростные параметры обеспечивают получение максимально плотной (без несплошностей) структуры. Режим экспонирования поддерживающих структур должен обеспечить наибольшую производительность штриховки для минимизации общей продолжительности построения детали при достаточной прочности. Энергетическое воздействие при экспонировании поверхностных элементов оптимизировано для получения минимальной шероховатости деталей. Перемещение лазера и образование ванны расплава сопровождается выбросом мельчайших капель расплава, как показано на рис. 1. Большая удельная поверхность образующихся фрагментов в процессе взаимодействия с газовыми примесями из защитной среды приводит к их окислению. Очевидно, что образование таких выбросов не может не сказываться на химическом составе и технологических характеристиках порошкового материала, остающегося после сплавления заготовок. При этом механизмы загрязнения оборотного порошка, влияние выбросов капель расплава на микроструктуру и механические свойства получаемых заготовок исследованы недостаточно подробно.

В работе [18] изучено влияние многократного использования порошка в процессе селективного электронно-лучевого сплавления порошка титанового сплава марки Ti-6-4 на примере образцов, испытанных при растяжении. Показано, что повторное использование

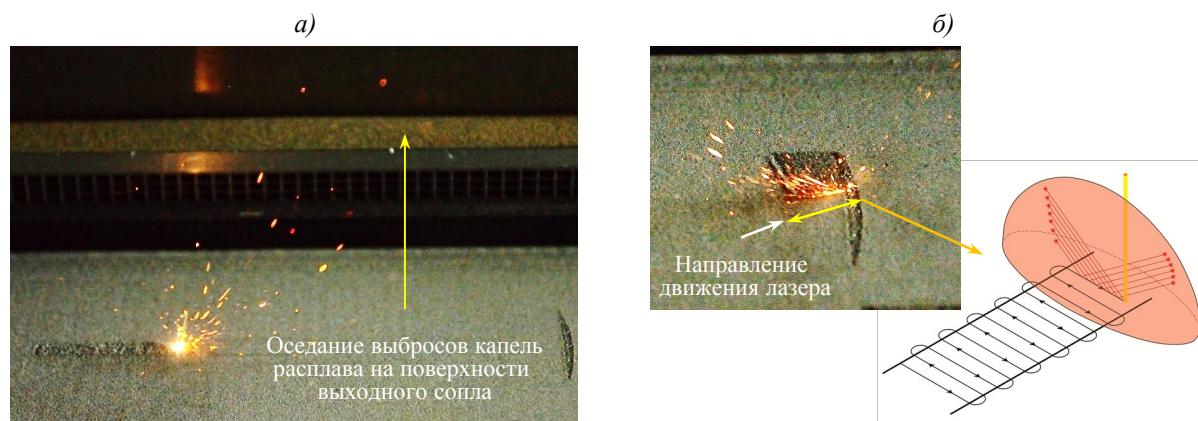


Рис. 1. Процесс селективного лазерного сплавления (а) и схема образования выбросов капель расплава (б)

порошка сплава марки Ti-6-4 до 21 раза не приводит к снижению механических свойств. В работе [19] авторский коллектив изучал повторное использование порошка сплава Inconel 718 в процессе СЛС и показал, что возможно 14-кратное применение порошка для процесса СЛС без значительного влияния на прочность, твердость, пористость и микроструктуру. В работе [20] показано укрупнение частиц вторичного порошка на примере нержавеющей стали марки 17-4PH и сплава системы Co-Cr при каждом новом цикле использования в процессе СЛС.

В каждом из вышеперечисленных случаев не обсуждались ни сложность геометрической формы сплавляемых моделей, ни общая площадь, занимаемая на платформе построения: исследования проводились на конкретной садке (наборе образцов) при ее многократном повторе. Не показан также механизм воздействия вторичного порошка на свойства детали. В работе [21] показано влияние выбросов порошка (порошок, на который оказано термическое воздействие), образующихся в процессе СЛС и попадающих в еще не сплавленные слои, на рельеф поверхности в зависимости от мощности потока инертного газа. В работе [1] на примере коррозионно-стойкой стали марки 304L показано, что отношение площади свободной от печати к площади сплавляемых слоев, а также расстояние между деталями на платформе построения влияют на количество вторичных гранул (выбросов), образующихся при СЛС.

В данной работе в ходе эксперимента синтезировали группы образцов (каждую группу по три раза) на установке Renishaw AM 250 для СЛС в среде аргона при остаточном содержании кислорода $<1000 \text{ ppm}$ ($<0,1\%$). Каждый отдельный образец – это прямоугольная призма квадратного сечения. Наборы образцов представляли собой матрицы с постепенным увеличением общей площади сплавляемых образцов при уменьшении общей высоты каждой последующей группы образцов за счет потерь сплавленного порошка. В результате показано [1], что хотя бы в одной из трех итераций увеличивается насыпная плотность и плотность утряски, что свидетельствует о повышении текучести оборотного порошка вследствие вовлечения в него идеально сферических вторичных гранул (выбросов), в то время как первичные гранулы, полученные газовой атомизацией, поражены сателлитами, снижающими текучесть. Это явление повышения плотности оборотного порошка также отмечено в работе [18].

Представляет интерес также оценка количества вторичных гранул методом рентгенофазового анализа. Сталь 304L является аустенит-

ной, которая кристаллизуется в общем случае следующим образом: $L \rightarrow L+\delta \rightarrow L+\gamma+\delta \rightarrow \gamma+\delta \rightarrow \gamma$ [22], при этом скорость охлаждения, достигаемая в камере установки для СЛС, заполненной защитным газом, обеспечивает условия для фиксации остаточного δ -феррита [23]. Однако при достижении экстремально высокой скорости охлаждения переохлажденный расплав затвердевает в виде первичного аустенита [24], а не через указанное перитектическое превращение. Такие экстремально высокие скорости охлаждения (порядка 10^5 – 10^6 K/c) достигаются в том числе в процессе газовой атомизации, в то время как относительно малая скорость охлаждения выбросов вторичных гранул при СЛС обеспечивает сохранение в них δ -феррита. Таким образом, δ -феррит является своеобразным маркером относительного количества вторичных гранул в оборотном порошке аустенитной стали 304L.

По результатам замеров содержания δ -феррита методом рентгеновского фазового анализа (РФА) наблюдается также его повышение с увеличением плотности загрузки платформы. Интересно, что при сравнении серий образцов в количестве 5×5 и 11×11 шт. с одинаковой (50%) загрузкой платформы построения повышение содержания δ -феррита, а следовательно, и количества выбросов вторичных гранул в оборотном порошке после каждой итерации происходит быстрее при увеличенном количестве образцов (11×11 шт.) Авторы работы [1] затрудняются объяснить данный факт, однако в работе [25] показано, что на содержание вторичных гранул в оборотном порошке влияет в первую очередь не сама площадь сплавления, а протяженность периметров контуров и наклонных поверхностей. Очевидно, что при сплавлении серии 11×11 шт. образцов соотношение периметров образцов к их площади значительно больше, чем для серии 5×5 шт. образцов.

В работе [2] исследованы свойства оборотного порошка и механические свойства синтезированных образцов на примере сплавов Inconel 718 и Ti-6-4 при проведении последовательных процессов синтеза. Для сплава Inconel 718 зафиксирован рост содержания кислорода в оборотном порошке с каждой новой итерацией, приведена аппроксимирующая прямая зависимости содержания кислорода от итерации. После проведения 42 процессов установлено значительное увеличение предела кратковременной прочности и уменьшение удлинения с 20 до 13%. К сожалению, в методиках этого исследования отсутствуют пояснения по количеству, геометрической форме и занимаемому объему образцов, изготавливаемых при каждой итерации.

В работе [3] авторы приводят результаты по исследованию влияния цикличности

применения порошка мартенситостареющей конструкционной стали марки 1.2709 (Германия) на пористость и шероховатость поверхности синтезированного материала. Схема эксперимента включала последовательный синтез трех образцов кубической формы ($\square 10$ мм) на платформе размером 250×250 мм. Цикл изготовления образцов повторяли 11 раз, в результате не отмечено изменений определяемых характеристик сплавленного металла или оборотного порошка. Авторы данной статьи считают, что эксперимент в работе [3] поставлен некорректно, а именно – оказано недостаточное воздействие на порошок (площадь сплавления 3 см^2 на плите площадью 1225 см^2), чтобы зарегистрировать адекватное изменение характеристик.

В работе [4] проводили исследования по использованию оборотных порошков сплавов Inconel 718, Ti-6-4, AlSi10Mg и Scalmalloy на установке Solutions 280 для СЛС. В результате проведенных исследований можно отметить изменение гранулометрического состава: во всех случаях, кроме титанового сплава, кумулятивная кривая сместилась правее, т. е. отмечено укрупнение гранул. Это объясняется тем, что мелкие гранулы при синтезе агломерируют с крупными и удаляются при последующем просеве через сито. Для порошка титанового сплава кумулятивная кривая стала более вертикальной при сохранении параметра D50 на том же уровне, т. е. гранулометрический состав стал более узким. Авторы работы [4] отмечают противоречивые результаты анализа содержания кислорода: для сплавов Inconel 718 после 38 циклов, Ti-6-4 после 11 циклов и Scalmalloy после 3 циклов его содержание снизилось по сравнению с содержанием в исходном порошке. В сплаве

AlSi10Mg содержание кислорода увеличилось в 2 раза после 6 циклов использования. Во всех случаях отмечено улучшение текучести порошка через воронку Холла и увеличение насыпной плотности.

Авторами данного исследования в работе [25] показано, что источником загрязнения оборотного порошка являются капли расплава, выбрасываемые из экспонируемой области, что может быть обусловлено двумя причинами: вскипанием расплава и взаимодействием теплового излучения с остаточной влагой порошкового материала. При этом в пользу первого свидетельствует наличие конденсата испарений расплава, уносимых системой обдува в процессе синтеза. В обоих случаях процесс выброса фрагментов расплава носит взрывной характер, что также показано в работе [25]. Кристаллизация фрагмента сопровождается его интенсивным окислением вследствие взаимодействия с примесью кислорода из защитной газовой среды, в которой происходит синтез.

Для визуализации процесса формирования выбросов капель расплава проведено моделирование потока обдува в камере построения (рис. 2). Механизм загрязнения порошка схематично представлен на рис. 2, б. Фрагменты расплава, обладая различной массой и начальным импульсом, взаимодействуют с газовым потоком системы обдува платформы построения: крупные частицы пробивают газовую «завесу», возвращаясь обратно в зону построения или оседая на горизонтальных поверхностях камеры вне зоны сплавления. Основная масса частиц среднего и малого размера увлекается системой обдува в коллектор. Часть гранул малого размера отражается от газовой «завесы» и попадает обратно

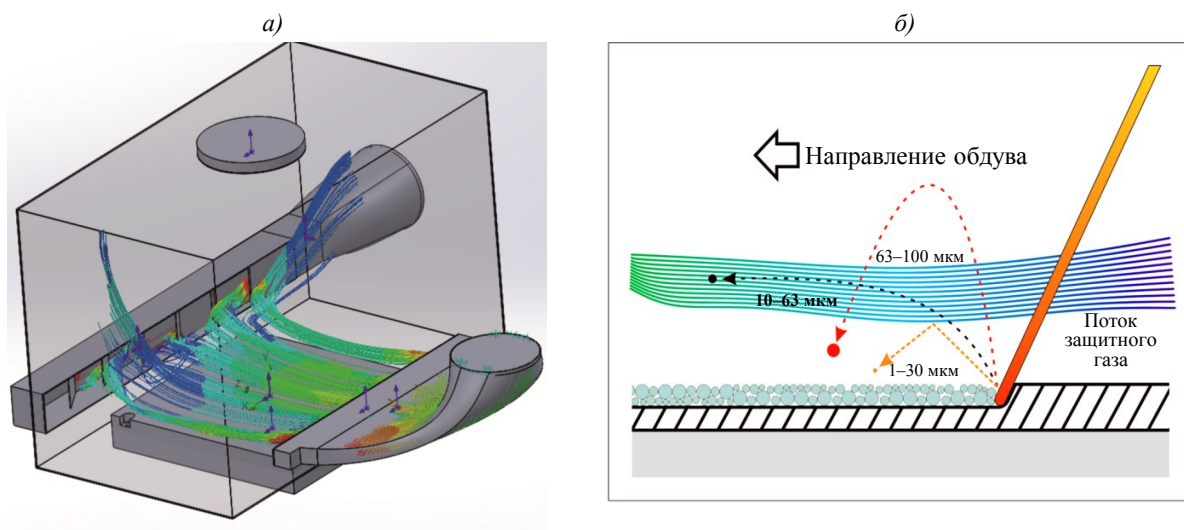


Рис. 2. Визуализация газового потока обдува платформы построения (а) и схема попадания выбросов капель расплава в оборотный порошок (б)

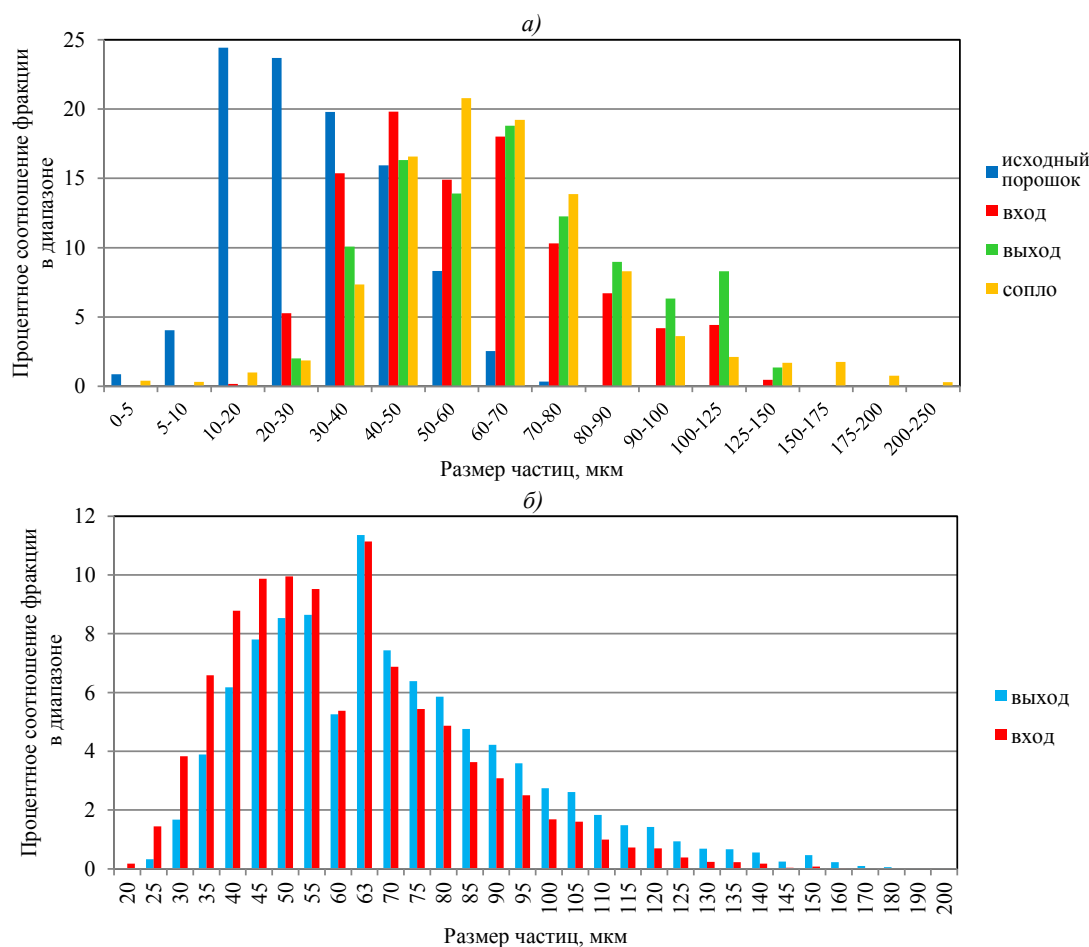


Рис. 3. Распределение частиц порошка, собранных на горизонтальных поверхностях входного и выходного сопла:

а – гистограмма сравнения фракций частиц порошка; *б* – гистограмма в увеличенном масштабе

в зону построения, в том числе и в оборотный порошок. Именно эти частицы ввиду большой площади поверхности и являются основным источником загрязнения оборотного порошкового материала.

Такой механизм косвенно подтверждается исследованием фракционного состава частиц, собранных с горизонтальных поверхностей входного и выходного сопла системы обдува и непосредственно внутри сопла, в сравнении с исходным порошком: все три образца практически не содержат частиц размером <20 мкм и очень мало (в сравнении с исходным порошком) – фракции 20–30 мкм (рис. 3, *а*). В систему обдува вовлекаются преимущественно частицы среднего диапазона (40–80 мкм). Общий профиль кривых распределения частиц, собранных с горизонтальных поверхностей входного и выходного сопла обдува платформы построения, практически идентичен, при этом кривая для выходного сопла смещена вправо – в область более крупных частиц (рис. 3, *б*), что объясняется воздействием газового потока.

В работе [25] показано, что режимы с относительно малым энергетическим воздействием приводят к более сильному загрязнению оборотного порошка кислородом (режимы экспонирования поддерживающих структур и контуров) за счет образования многочисленных мелких выбросов. Соответственно, по фракционному составу оборотного порошка и содержанию кислорода (или количеству окисленных частиц) можно косвенно судить и об энергетическом воздействии процесса синтеза. Так, сравнение собранных вне зоны построения частиц порошка при синтезе никелевого жаропрочного сплава ВЖ159 и коррозионно-стойкой стали показывает, что для стали характерно образование более крупных частиц выбросов, что, вероятно, связано с большим (почти на 30%) энергетическим воздействием в процессе экспонирования и более интенсивным кипением ванны расплава. При этом в обоих случаях на поверхностях камеры построения присутствуют и первичные, не затронутые тепловым воздействием частицы, т. е. исходный порошок, как показано в работе

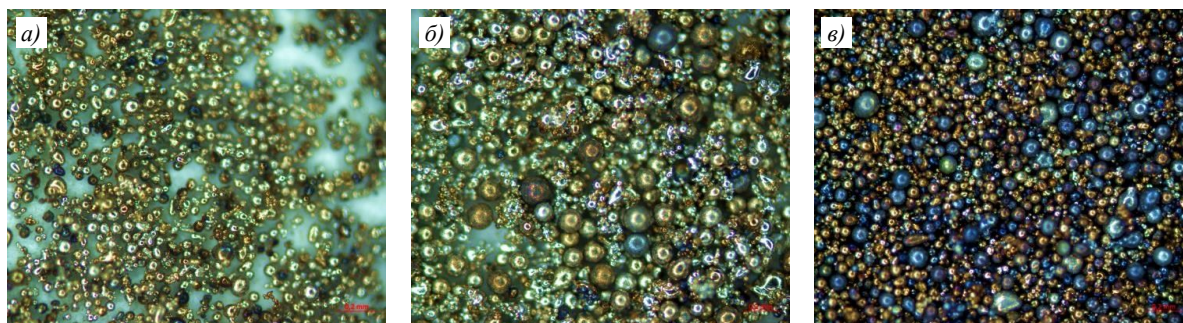


Рис. 4. Внешний вид частиц порошка сплава ВЖ159 (а, б) и коррозионностойкой стали (в), собранных с горизонтальной поверхности камеры построения (а) и непосредственно из выходного сопла системы обдува (б, в)

[25]. Исследование внешнего вида частиц порошка, полученных непосредственно из выходного сопла системы обдува, показывает ее весьма высокую эффективность: основную массу частиц составляют окисленные гранулы, причем интенсивность их окисления и число окисленных гранул намного больше, чем частиц, собранных с поверхностей камеры построения (рис. 4).

Однако стопроцентной эффективности системы обдува обеспечить невозможно в принципе. Накопление «выбросов» при циклическом использовании оборотных порошков и приводит к постепенной деградации синтезированного материала. Вместе с тем это же и создает основную проблему по корректной оценке степени деградации. Описанные ранее методики, примененные зарубежными авторами, в большинстве случаев предполагают выращивание набора образцов преимущественно по режиму основного металла. Оценить в таких условиях реальную степень деградации оборотного порошка и синтезированного металла достаточно сложно. В работе [25] показано, что технически возможно определить коэффициенты загрязнения оборотного порошкового материала при сплавлении каждого отдельного элемента, формирующего деталь, включая поддерживающие структуры, т. е. в зависимости от энергетического воздействия при экспонировании. Поэтому основной задачей при разработке методики прогнозирования степени деградации оборотного порошкового материала является создание расчетного метода, направленного на подсчет всех составляющих элементов по каждому сечению детали, включая синтез поддерживающих структур.

В наиболее совершенных установках для СЛС реализован весьма сложный многопараметрический алгоритм экспонирования поверхностных элементов, при этом удельная объемная плотность подводимой энергии для различных элементов может отличаться более чем на порядок, что приводит к измене-

нию количества окисленных выбросов, их дисперсности и, соответственно, к различному «загрязнению» оборотного порошкового материала. Более подробно принцип построения поверхностей рассмотрен в работе [26].

Цветовая визуализация режимов (рис. 5), применяемых для экспонирования поверхностных элементов, показанных на сегментах сложнопрофильной модельной детали, позволяет оценить всю сложность алгоритма построения и учета их в расчетном алгоритме для прогнозирования загрязнения оборотного порошка. На приведенных отдельных сечениях модельной детали показано, насколько в одной детали могут изменяться соотношения различных режимов экспонирования в сечениях сложной геометрической формы.

Результаты и обсуждение

Задача автоматического соотнесения коэффициентов загрязнения (например, по приросту содержания кислорода в оборотном порошке) с составляющими режима экспонирования каждого сечения элементами может быть решена с помощью расчета протяженности траектории лазера при «штриховке» сечений и контуров или продолжительности экспонирования этих элементов. При этом для расчета данных параметров необходимо либо раскрытие информации в части алгоритма подсчета времени работы производителем аддитивной машины, либо визуализация всех элементов экспонирования каждого сечения детали с полным отображением траекторий движения лазера и с графической дифференциацией треков в зависимости от элемента экспонирования. Такую возможность дают современные программы для подготовки разбитых на сечения моделей к печати.

Для решения проблемы автоматического анализа сечений и расчета протяженности траекторий движения лазера для всех применяемых режимов экспонирования авторами данной статьи предложена методика, включающая накопление массива графических

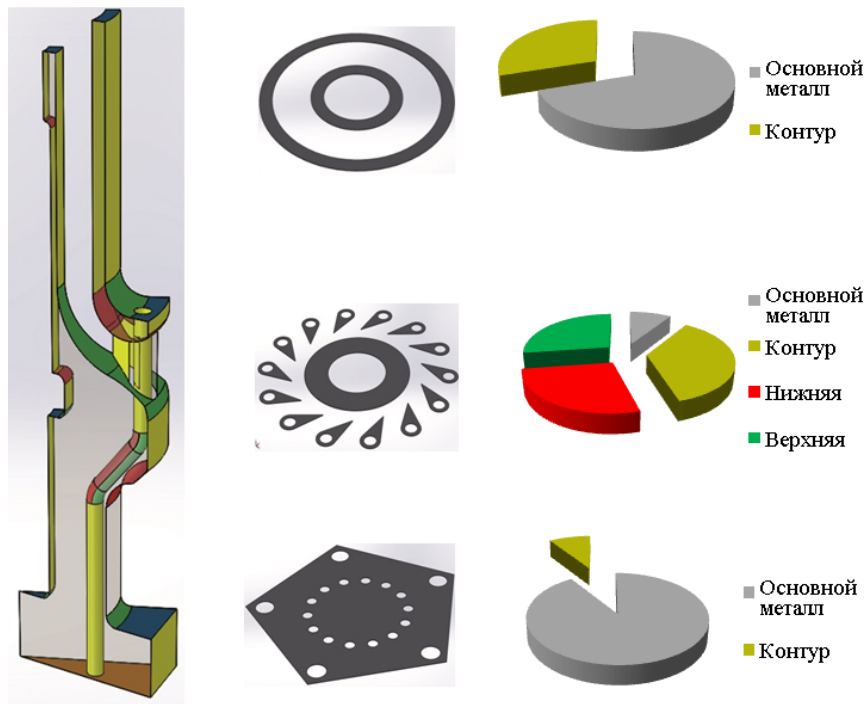


Рис. 5. Визуализация режимов экспонирования поверхностных элементов и изменение их соотношения при синтезе конкретных сечений (энергетическое воздействие при экспонировании для режимов различно)

данных по траекториям лазера в каждом сечении и для каждого примененного режима в этих сечениях с последующим их анализом в части конвертации графических данных в протяженность треков или длительность их экспонирования в доступных программах, применяемых для анализа

изображений, в частности для металлографического анализа. Для набора массива графической информации разработана программа, позволяющая автоматически сохранять изображение траекторий движения лазера послойно для любой 3D-модели. Схематично принцип расчета приведен на рис. 6.

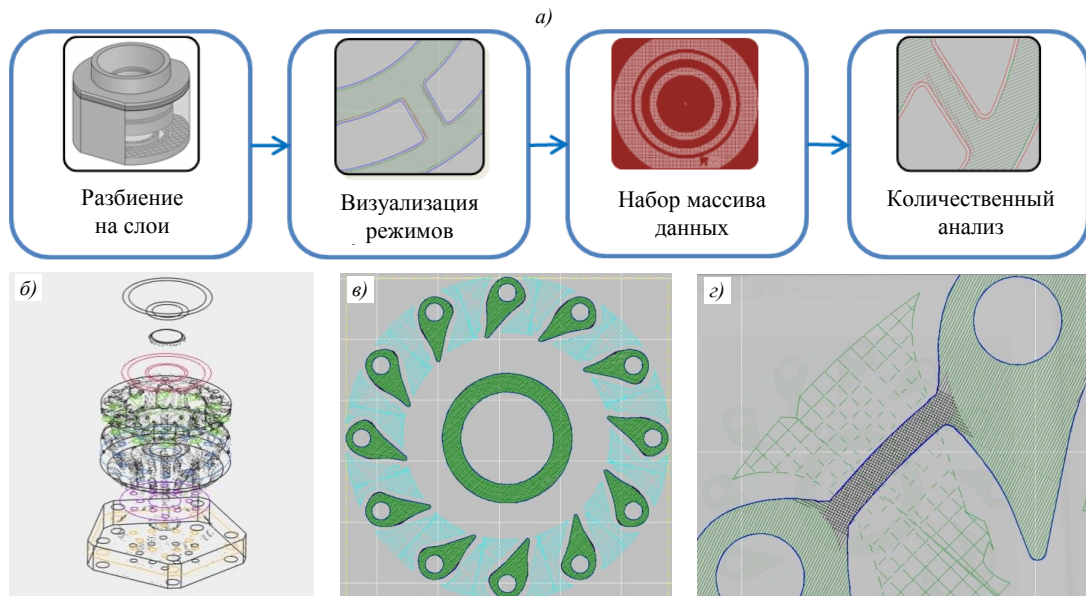


Рис. 6. Схема расчета (а) протяженности траекторий движения лазера и создание массива графической информации (б) для расчета протяженности треков на различных режимах экспонирования (в, г)

Такой метод позволяет прогнозировать загрязнение оборотного порошкового материала с учетом геометрической формы детали, их количества на платформе построения, а также позволяет учитывать наличие образцов-свидетелей и их вклад в загрязнение оборотного порошка (при таком же расчете протяженности траекторий лазера на всех режимах построения образца). В качестве начальных данных необходимо определить коэффициенты загрязнения оборотного порошка при экспонировании отдельных элементов, количество которых конечно (поддерживающие структуры, основной металл, контуры), при рассмотрении не конкретной детали, а материала в целом, т. е. коэффициенты определяются для каждого конкретного сплава однократно. Применение метода возможно как для экспериментальных процессов, так и для серийного изготовления деталей методом СЛС, при этом основной задачей является накопление массива данных, позволяющих соотнести прогнозируемый (и фактический) уровень загрязнения оборотных порошков с деградацией структуры и механических свойств синтезированного материала.

Заключения

Проведен анализ зарубежных научно-технических публикаций в части оценки

влияния кратности использования оборотного порошка в процессе СЛС на уровень примесей, технологические характеристики и механические свойства синтезированных материалов. Показано, что методики, примененные зарубежными авторами, предполагают в большинстве случаев выращивание набора образцов преимущественно по режиму основного металла, что не позволяет не только прогнозировать уровень загрязнения порошка в реальных производственных условиях, но даже корректно оценить его в рамках проведенных экспериментов.

При анализе экспериментальных данных показана принципиальная возможность создания универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования порошка в процессе СЛС.

Предложено решение задачи автоматического соотнесения коэффициентов загрязнения с составляющими режима экспонирования каждого сечения элементами путем расчета протяженности траектории лазера при «штриховке» сечений и контуров или продолжительности экспонирования этих элементов.

Библиографический список

1. Kriewall C.S., Sutton A.T., Karnati S. et al. Effects of Area Fraction and Part Spacing on Degradation of 304L Stainless Steel Powder in Selective Laser Melting // Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper. 2017. P. 277–288.
2. Powder Degradation in Serial Production. URL: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/6205315/carpenter_additive/image/Resources/CaseStudies/2019/Powder%20Degradation%20in%20Serial%20Production.pdf (дата обращения: 31.08.2020).
3. Sukal J., Palousek D., Koutny D. The effect of recycling powder steel on porosity and surface roughness of slm parts // Modern Machinery Science Journal. 2018. No. 5. P. 2643–2647. DOI: 10.17973/MMSJ.2018_12_2018110.
4. Cordova L., Campos M., Tinga T. Revealing the Effects of Powder Reuse for Selective Laser Melting by Powder Characterization // Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2019. Vol. 71. No. 3. P. 1062–1072.
5. Barclift M., Joshi S., Simpson T., Dickman C. Cost modeling and depreciation for reused powder feedstock in powder bed fusion additive manufacturing // Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper. 2017. P. 2007–2028.
6. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Мазалов И.С., Шуртаков С.В., Зайцев Д.В., Прагер С.М. Эволюция структуры и свойств высокохромистого жаропрочного сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления. Ч. I // Материаловедение. 2019. №3. С. 9–17. DOI: 10.31044/1684-579X-2019-0-3-9-17.
7. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Мазалов И.С., Шуртаков С.В., Зайцев Д.В., Прагер С.М. Эволюция структуры и свойств высокохромистого жаропрочного сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления. Ч. II // Материаловедение. 2019. №4. С. 9–15. DOI: 10.31044/1684-579X-2019-0-4-9-15.
8. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Мазалов И.С., Шуртаков С.В., Зайцев Д.В., Прагер С.М. Структура и свойства синтезированных методом СЛС сплавов ЭП648 и ВЖ159 после имитационных отжигов // Материаловедение. 2020. №6. С. 3–10. DOI: 10.31044/1684-579X-2020-0-6-3-10.

9. Заводов А.В., Петрушин Н.В., Зайцев Д.В. Микроструктура и фазовый состав жаропрочного сплава ЖС32 после селективного лазерного сплавления, вакуумной термической обработки и горячего изостатического прессования // Письма о материалах. 2017. №7 (2). С. 111–116.
10. Раевских А.Н., Чабина Е.Б., Петрушин Н.В., Филонова Е.В. Исследование структурно-фазовых изменений на границе между монокристаллической подложкой и сплавом ЖС32-ВИ, полученным селективным лазерным сплавлением, после воздействия высоких температур и напряжений // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №1 (73). Ст. 01. URL: <http://www.viam-work.ru> (дата обращения: 31.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-3-12.
11. Лукина Е.А., Филонова Е.В., Тренингов И.А. Микроструктура и преимущественные кристаллографические ориентировки жаропрочного никелевого сплава, синтезированного методом СЛС, в зависимости от энергетического воздействия и термообработки // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-38-44.
12. Тренингов И.А., Заводов А.В., Петрушин Н.В. Исследование кристаллической структуры и микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, синтезированного методом селективного лазерного сплавления, после высокотемпературных механических испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65.
13. Агаповичев А.В., Сотов А.В., Смелов В.Г., Зайцев И.О. Исследование структуры и механических свойств образцов, полученных с использованием технологии селективного лазерного сплавления из металлического титанового порошка марки ВТ6 // Материалы IV Междунар. конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 30 марта 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 9–17.
14. Юдин А.В., Береговский В.В., Свистунов Е.И., Кунавин С.А. Исследования конструкционных материалов, полученных методом селективного лазерного плавления на отечественном оборудовании Meltmaster 3D-550 // Материалы V Междунар. конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 22 марта 2019 г.). М.: ВИАМ, 2019. С. 416–430.
15. Карпов М.И., Прохоров Д.В., Строганова Т.С., Гнесин Б.А., Светлов И.Л. О возможности разработки особо жаропрочных сплавов на основе эвтектики в системе Nb–Nb₂C // Материалы IV Междунар. конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 30 марта 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 363–364.
16. Медведев П.Н., Гуляев А.И. Анализ пространственного распределения трещин в жаропрочном никелевом сплаве, изготовленном по технологии СЛС // Авиационные материалы и технологии. 2020. №1 (58). С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-12-18.
17. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
18. Tang H.P., Qian M., Liu N. et al. Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti–6Al–4V by Selective Electron Beam Melting // Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2015. Vol. 67. No. 3. P. 555–563.
19. Ardila L.C., Garcíandia F., González-Díaz J.B. et al. Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting // Physics Procedia. 2014. Vol. 56. P. 99–107.
20. Slotwinski J.A., Garboczi E.J., Stutzman P.E. et al. Characterization of metal powders used for additive manufacturing // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2014. Vol. 119. P. 460–493.
21. Ladewig A., Schlick G., Fisser M. et al. Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process // Additive Manufacturing. 2016. Vol. 10. P. 1–9.
22. Sutton A.T., Kriewall C.S., Leu M.C., Newkirk J.W. Characterization of Heat-Affected Powder Generated during the Selective Laser Melting of 304L Stainless Steel Powder // Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper, 2017. P. 261–276.
23. Guan K., Wang Z., Gao M. et al. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel // Materials and Design. 2013. Vol. 50. P. 581–586.
24. Wright R.N., Flinn J.E., Korh G.E. et al. The microstructure and phase relationships in rapidly solidified type 304 stainless steel powders // Metallurgical Transactions: A. 1988. Vol. 19. P. 2399–2405.
25. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Прагер С.М., Малинин Р.Ю. Особенности загрязнения оборотного порошкового материала в процессе селективного лазерного синтеза // Технология металлов. 2018. №11. С. 21–29.
26. Чабина Е.Б., Евгенов А.Г., Королев В.А., Раевских А.Н., Филонова Е.В. Особенности послойного формирования структуры изделий из никелевых жаропрочных сплавов при селективном лазерном сплавлении // Фундаментальные основы инженерных наук: сб. науч.-популяр. статей. М., 2017. С. 250–261.