

УДК 620.18

DOI: 10.34759/vst-2021-2-202-217

### ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Балякин А.В.\* , Скуратов Д.Л.\*\* , Хаймович А.И.\*\*\*, Олейник М.А.\*\*\*\*

*Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва (Самарский университет),  
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

*\* e-mail: balaykinav@ssau.ru*

*\*\* e-mail: skuratov-sdl56@ya.ru*

*\*\*\* e-mail: berill\_samara@bk.ru*

*\*\*\*\* e-mail: oleynik1997@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 12.05.2021

Представлен обзор методов аддитивного производства, активно используемых при изготовлении деталей авиационных и ракетных двигателей, дана их классификация в зависимости от используемого источника энергии и формы исходного материала. Изложены преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными методами формообразования деталей и изделий, рассмотрена технология изготовления заготовок деталей из жаропрочных сплавов методом прямого лазерного сплавления металлических порошков. Приведены примеры успешного использования аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли при производстве различных деталей. Рассмотрены основные составляющие установок для прямого лазерного сплавления, влияющие на качество получаемых заготовок. Приведены параметры, влияющие на процесс прямого лазерного сплавления и на качество формообразования заготовок, а также изложены преимущества и недостатки данного процесса. Выполнен анализ дефектов, таких, как пористость, растрескивание, термические остаточные напряжения, нередко сопровождающих процесс сплавления, и определены возможные причины их появления.

*Ключевые слова:* аддитивное производство, прямое лазерное сплавление, жаропрочный сплав, дефекты сплавления.

#### Введение

Жаропрочные сплавы на никелевой основе нашли весьма широкое применение при изготовлении изделий энергетического и аэрокосмического машиностроения. Особенно велика их доля в общей массе современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), поскольку они яв-

ляются предпочтительными материалами для производства дисков, лопаток, камер сгорания, корпусов турбин и т.д. [1, 2]. Заготовки для изготовления указанных деталей получают традиционными методами, такими, как литье, обработка металлов давлением, а также методом порошковой металлургии [3, 4]. При этом следует

отметить, что традиционные методы изготовления деталей предполагают изготовление дорогостоящей оснастки (литейной, штамповой), производство которой занимает значительное время [5–7]. Кроме того, при традиционном производстве деталей, в частности из жаропрочных сплавов, масса исходных заготовок может в 15 раз превышать массу готовых деталей, а литейные отходы, как показывает производственный опыт, не всегда могут быть использованы повторно. При этом жаропрочные сплавы, как правило, плохо обрабатываются резанием, а в процессе механической обработки заготовок образуется большое количество стружки, переработка которой требует специальных технологий и, следовательно, дополнительных материальных затрат.

Разработка в 70-х годах прошлого века технологии получения отливок из жаропрочных сплавов на основе никеля методом направленной кристаллизации обеспечила повышение сопротивления ползучести деталей за счет устранения границ зерен, расположенных поперечно оси нагружения [8–11]. Дальнейшее совершенствование процесса литья и разработка метода получения монокристаллических отливок по выплавляемым моделям позволили почти полностью устранить границы зерен и дополнительно повысить сопротивление ползучести. А это, в свою очередь, обеспечило возможность увеличения температуры на входе в турбину и повышение эффективности двигателя [12, 13]. Нанесение на рабочие поверхности деталей термобарьерных покрытий и усовершенствование конструкций путем применения внутренних охлаждающих каналов позволило использовать данные детали из суперсплавов на основе никеля, в частности лопатки турбин, при температурах, превышающих собственную температуру плавления [14].

Развитие и активное использование в производстве аддитивных технологий (АТ) обеспечило возможность изготовления деталей и изделий из металла посредством расплавления порошка и получения сплошной твердофазной структуры [16–18]. Аддитивные технологии позволяют за сравнительно небольшое время изготавливать детали со сложной геометрической формой, получение которых традиционными методами либо невозможно, либо очень трудоемко. Следует также отметить, что изготовление любой детали посредством аддитивных технологий может быть начато сразу же после того, как она будет смоделировано в САД-системе. Применение аддитивных технологий позволяет снизить коэффи-

циент использования материала и тем самым снизить стоимость производства.

С помощью АТ могут быть изготовлены изделия, обладающие высокими механическими характеристиками. Однако качество получаемых деталей либо изделий зависит от многих функциональных и технологических параметров процесса, правильный выбор которых является основополагающим фактором для обеспечения заданных свойств. Применение исходных порошковых материалов в дисперсном виде и высоких скоростей кристаллизации при сплавлении слоев детали позволяет получить однородную мелкозернистую структуру, которую при традиционных технологиях литья обеспечить невозможно. Таким образом, можно избежать структурных дефектов материала, связанных с литьем, при использовании сплавов, традиционно считающихся проблемными, а именно высокохромистых никелевых сплавов и интерметаллидных никелевых сплавов для поликристаллического литья.

При изготовлении деталей из жаропрочных сплавов на основе никеля посредством АТ их механическая прочность в значительной мере будет зависеть от морфологии зерен и образования наплавленного валика [19]. Мелкозернистая микроструктура в материале, получаемом методами АТ, обычно обеспечивает более высокую твердость и прочность на растяжение по сравнению с деталями, получаемыми методами литья [20]. Однако дефекты АТ или нежелательные фазы могут ухудшить прочность материала.

### Обзор методов аддитивного производства

Аддитивное производство включает группу процессов, позволяющих изготавливать детали посредством послойного добавления материала, используя данные, получаемые из САД-систем. Применяя данное производство, можно создавать, модифицировать или ремонтировать детали и их элементы, максимально используя материал заготовки, в отличие от традиционных методов субтрактивного производства, таких, как механическая обработка, при которой материал удаляется с исходной заготовки до тех пор, пока не будет получена требуемая форма [18–23]. Существует множество технологий, которые позволяют аддитивно производить детали из сталей и сплавов (табл. 1), как правило, путем плавления порошка или проволоки и консолидации расплава с нижними слоями детали.

Аддитивные технологии обладают рядом достоинств, к которым следует отнести:

Таблица 1

**Общая классификация технологий аддитивного производства в зависимости от источника энергии и способа подачи исходного материала в зону плавления**

Источник энергии	Способ подачи исходного материала в зону плавления		
	Непрерывно посредством газопорошковой струи	Предварительное нанесение порошка на поверхность перед сплавлением	Непрерывно в виде проволоки
Лазерный луч	Прямое лазерное сплавление металла [24]	Селективное лазерное сплавление [25]	Лазерное сплавление [26]
Электронный луч	–	Электронно-лучевое сплавление [27]	Электронный луч свободной формы [27]
Электрическая дуга	–	–	Фасонное формирование металлической проволокой [28]

1. *Снижение затрат на материалы.* Наблюдается резкое снижение брака в производстве, поэтому эффективность использования материала значительно увеличивается.

2. *Снижение затрат на электроэнергию.* Порошковое сырье для аддитивного производства может производиться непосредственно из расплавленного металла, поэтому нет необходимости в литье, ковке, прокатке и т.д.

3. *Сокращение времени на производство.* Стадия проектирования детали переходит к стадии её изготовления непосредственно из CAD-систем без необходимости дополнительного проектирования и изготовления оснастки для заготовительного производства.

4. *Объединение комплектующих сборочных единиц либо изделий в одно целое.* Изделия, которые обычно собираются из нескольких деталей, могут изготавливаться в виде единого интегрированного объекта, что устраняет необходимость применения сварки, пайки или других сборочных операций. А благодаря этому повышается прочность и снижаются масса и стоимость изделия.

5. *Возможность создания деталей со сложной внутренней конфигурацией.* Выращивая деталь либо изделие путем послойного сплавления материала, можно получать объекты со сложными внутренними элементами, в частности с перегородками, ребрами жесткости, полостями и т.д., что обеспечивает возможность снижения массы изделия и затрат на производство.

6. *Создание топологически оптимизированных деталей и изделий.* Использование при проектировании деталей и изделий метода конечных элементов позволяет создавать твердотельные объекты с конфигурациями, обеспечивающими выполнение деталями (изделиями) всех их функциональных предназначений при минимальной массе. Аддитивное производство предоставляет

возможность быстрого и экономичного изготовления таких деталей и изделий.

7. *Возможность выполнения ремонта неремонтпригодных дорогостоящих деталей и изделий.* Твердотельные объекты со сложной конфигурацией, изготавливаемые из высоколегированных сталей и сплавов, которые ранее считались несвариваемыми, могут быть отремонтированы посредством использования методов АТ при обеспечении минимальных искажений формы и незначительных микроструктурных дефектах по сравнению с традиционными процессами сплавления, такими, как дуговая сварка.

Таким образом, использование аддитивных технологий при изготовлении деталей и изделий позволяет создавать топологически оптимизированные конструкции, значительно повысить коэффициент использования материала, максимально уменьшить припуски на последующую постобработку [15], обеспечить снижение трудоемкости изготовления деталей (изделий) и высокую эффективность процесса производства.

При формообразовании заготовок деталей, изготавливаемых с применением аддитивных технологий, используется столько материала, сколько необходимо для придания им формы, близкой к форме деталей, с минимальными необходимыми припусками под последующую механическую обработку [15]. Это дает инженерам-конструкторам, во-первых, большую свободу при проектировании конструкций изделий, а во-вторых, позволяет обеспечить существенное снижение их массы за счет оптимизации формы. Кроме того, при изготовлении изделий обеспечивается высокая экономическая эффективность производства. Данные преимущества аддитивных технологий особенно привлекательны для производства деталей сборочных единиц и изделий аэрокосмической отрасли, поскольку снижение мас-

сы позволяет уменьшить расход топлива, что, в свою очередь, ведет к улучшению экономических эксплуатационных характеристик летательных аппаратов [29].

В 2013 году корпорация GE Aviation подписала соглашение о сотрудничестве в области аддитивного производства с компанией Sigma labs и намерении произвести к 2020 году с использованием методов АТ более 100 000 комплектующих для своих авиационных двигателей LEAP TM и GE9X. Эти комплектующие представляют собой в основном топливные форсунки, которые, как сообщается, на 25% легче и на 500% долговечнее, чем форсунки, изготавливаемые традиционными методами [30].

В 2006 году Европейская комиссия профинансировала крупный совместный проект, известный как «FANTASIA», направленный на разработку гибких генеративных производственных цепочек и технологий ремонта деталей авиационных двигателей сложной формы. Этот проект стоимостью 6,5 млн евро был реализован Фраунгоферовским институтом лазерной техники (Германия, Fraunhofer ILT). Целью проекта являлось сокращение затрат на ремонт и снижение времени выполнения операций на 40%. Этот проект продемонстрировал, как технологии аддитивного производства могут использоваться для ремонта и изготовления дорогостоящих ком-

понентов двигателя, таких, как корпуса и кожухи турбин высокого давления, изношенные дорожки подшипников на барабане компрессора высокого давления, а также для наплавки лопаток непосредственно на диск турбины, изготовленный методом порошковой металлургии, т.е. для получения диска с лопатками (BLISK) [32, 33].

### Технология прямого лазерного сплавления металлических порошков

Наиболее перспективной аддитивной технологией изготовления заготовок крупногабаритных деталей из жаропрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов является прямое лазерное сплавление (ПЛС), при котором изделие формируется на подложке из порошка, подаваемого сжатой газопорошковой струей непосредственно в зону сплавления [34—38]. Металлический порошок вдвигается в ванну расплава, созданную лазером, инертным газом посредством специально разработанного сопла для его подачи, точно совмещенного с лазером для обеспечения оптимального захвата порошка. Когда порошок попадает в ванну расплава, он плавится и ассимилируется с жидкостью, в результате чего объем расплава увеличивается (рис. 1).

Прямое лазерное сплавление металлических порошков на материале подложки является потенциальной заменой традиционных методов

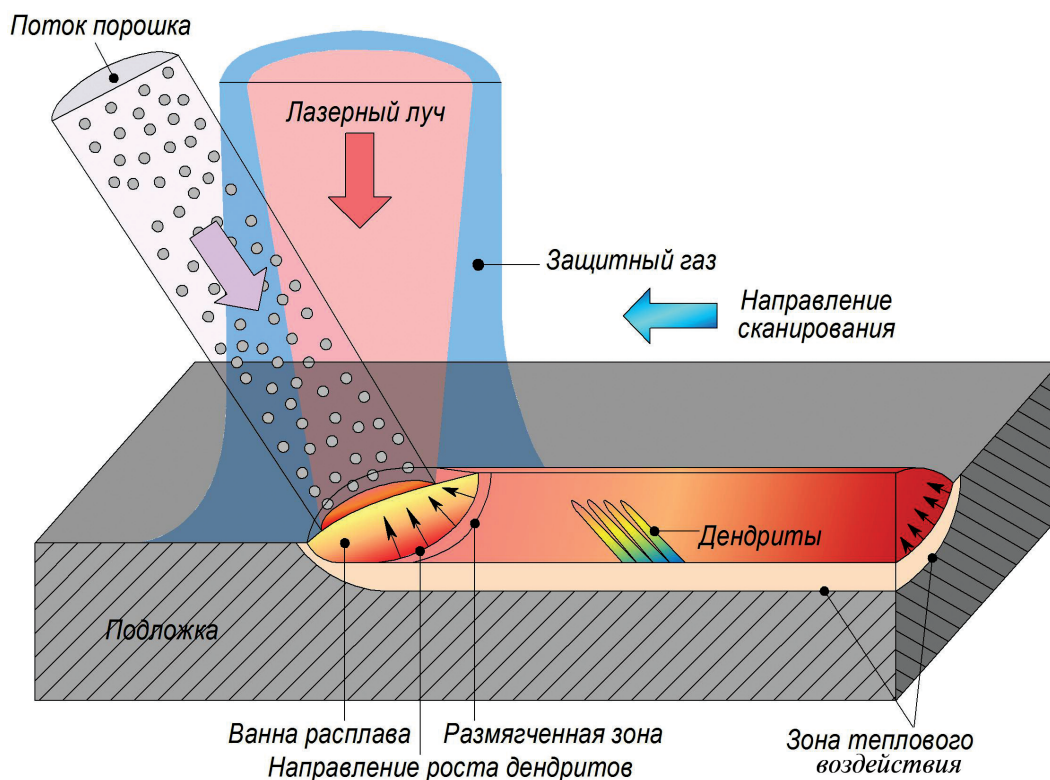


Рис. 1. Схема процесса прямого лазерного сплавления металла

получения заготовок для целого ряда деталей, изготавливаемых из дорогостоящих труднообрабатываемых материалов. Вместе с тем следует отметить, что создание с помощью ПЛС деталей, имеющих сложные внутренние элементы и выступы, довольно проблематично, так как должен быть материал, поддерживающий ванну расплава, формируемую лазером при осуществлении данного процесса. Если же материала для поддержки ванны расплава недостаточно, то процесс сплавления быстро станет нестабильным, что приведет к ухудшению качества изготовления заготовки. Однако, как показала практика применения ПЛС, простые заготовки с низкоугловыми или вертикальными боковыми стенками могут быть относительно легко изготовлены из самых разных материалов путем простого 3-осевого перемещения [21]. Более сложные детали, например те, что показаны на рис. 2, можно сплавлять, изменяя угол наклона заготовки относительно наплавочной головки, используя 5-осевой манипулятор. Эта процедура обеспечит расположение

ванны расплава в горизонтальной плоскости, что делает процесс сплавления более стабильным.

К недостаткам данного метода следует отнести, во-первых, относительно высокую толщину валиков, что приводит к росту шероховатости поверхности выращенных изделий, а во-вторых, возможность появления дефектов в виде рыхлоты, пор и спаев, т.е. несплошностей [19]. Используя ПЛС в качестве дополнительного процесса формообразования заготовки в рамках производственного маршрута изготовления детали, можно существенно упростить технологический процесс путем исключения ненужных и дорогостоящих этапов. Например, заготовки стоек взлетно-посадочных устройств самолетов (шасси) обычно изготавливают посредством их поэтапной штамповки. При этом на каждом этапе уточняются форма и характеристики заготовки [26]. Для формообразования многочисленных выступов, фланцев и бобышек, которые являются частью конструкции, требуются как операции пластического деформирования, напримерковки в закрытых штампах, так и операции механической обработки. В качестве альтернативы можно взять заготовку простой формы без каких-либо бобышек, фланцев и выступов и, используя технологию ПЛС, вырастить на ней необходимые элементы, причем по форме близкие к конечным элементам. В этом случае из технологического процесса изготовления детали можно исключить ряд дорогостоящих и трудоёмких операций. Такой способ изготовления деталей получил наименование гибридного производства, так как он представляет собой комбинацию традиционных методов субтрактивного и аддитивного производства.

Несмотря на то что процесс ПЛС позволяет производить сплавление детали с относительно небольшой шероховатостью поверхности, тем не менее для обеспечения чистоты поверхности и геометрической точности полученной детали требуется последующая постобработка, например сверление, фрезерование, нарезание резьбы, шлифование и т.д.

За последние несколько лет на мировом рынке появилось несколько систем, которые объединяют 5-осевой обрабатывающий центр с числовым программным управлением (ЧПУ) и камеру для лазерного сплавления (рис. 2). Одной из таких систем является система, созданная компанией Hybrid Manufacturing Technologies Ltd [39], которая, помимо процесса ПЛС заготовок и их механической обработки, позволяет загру-



а)



б)

Рис. 2. Наплавка элементов заготовки путем ПЛС металлического порошка (а) и технологический процесс механической обработки заготовки (б) [33]

зить заготовку в приспособление внутри обрабатываемой ячейки, а затем с помощью сканирующего зонда измерить её внешнюю поверхность и получить САД-файл, на основе использования которого генерируются траектории сплавления и механической обработки в соответствии с желаемой окончательной геометрией детали [40].

Сканирование заготовок и адаптивная генерация траектории обработки [41] корректируют тепловую деформацию детали, обеспечивая точность траекторий обработки и воспроизводимое качество готовых деталей. Практически полная автоматизация систем и высокая степень повторяемости параметров качества, характеризующих деталь, делают эти системы пригодными для крупносерийного ремонта и гибридных процессов производства небольших деталей, таких, как лопатки турбин авиационных двигателей, причем с потенциалом значительной экономии материалов и производственных затрат.

В отличие от традиционных процессов сварки, в частности таких, как дуговая сварка неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа, ПЛС металла позволяет чрезвычайно точно контролировать размер зоны плавления и количество тепла, поступающего в заготовку. То есть процесс лазерного наплавления металла способен обеспечить требуемую микроструктуру наплавленной детали и избежать при этом появления трещин.

Например, монокристаллические лопатки турбин производятся с использованием сложного процесса литья по выплавляемым моделям, при котором удаляются все кристаллы за исключением одного с целью устранения границ зерен и повышения сопротивления ползучести. В течение определённого времени эксплуатации периферийная часть лопаток изнашивается, поэтому лопатки необходимо либо подвергнуть ремонту, либо заменить. Для ремонта турбинных лопаток, изготовленных методом направленной кристаллизации (столбчатой или монокристаллической), достаточно широко используется прямое лазерное сплавление, поскольку при данном процессе можно контролировать мощность теплового потока и текстуру кристаллизации, так как происходит эпитаксиальный рост на границе плавления и сохраняется кристаллографическая микроструктура в направлении  $\langle 001 \rangle$  [42, 43].

Используя несколько питателей, через которые осуществляется подача порошка из различных сплавов, можно регулировать состав наплаваемого материала, например по высоте напла-

ки. Такая технология подачи порошка в зону расплава позволяет уменьшить межфазные напряжения между подложкой и основным материалом, уменьшить гальванический потенциал на границе раздела, который может привести к ускоренной коррозии, а также придать различные свойства (ударную вязкость, коррозионную стойкость, твердость или износостойкость) отдельным участкам детали.

ПЛС металла также является жизнеспособным методом изготовления композитов с металлической матрицей (ММС), в которых твердые упрочняющие фазы, такие, как карбиды или оксиды, удерживаются в матрице металла с более низкой точкой плавления. При совместной подаче армирующей фазы с матричным порошком в зону формообразования объекта лазерного нагрева ванны расплава будет вполне достаточно для расплавления матричного порошка. При этом частицы материала, предназначенные для армирования, останутся нетронутыми [44]. Вместе с тем следует отметить, что правильный подвод тепла от лазера имеет решающее значение для того, чтобы армирующий материал не плавился и не поглощался матрицей. Метод ПЛС можно также использовать для выполнения микролегирования, при котором порошки исходного материала различного состава подаются в сопло, где они плавятся с помощью лазера с образованием покрытия. При этом химический состав покрытия в процентах будет складываться из процентного содержания каждого компонента (порошка), входящего в состав покрытия.

### Сопла для подачи порошка в технологии ПЛС

Во многих системах сопло для подачи порошка устанавливается коаксиально лазерному лучу, так что лазерный луч проходит через отверстие в центре сопла (рис. 3, а, б). Это позволяет порошку попадать в ванну расплава под разными углами, что придает процессу гибкость для движения практически в любом направлении. Сопла с боковой подачей более специфичны, так как они подходят только для наплавки в одном направлении (рис. 3, в) [21, 27].

### Коаксиальные сопла с кольцевым каналом

Эти сопла состоят из пары усечённых концентрических конусов, обычно выполненных из латуни или меди (рис. 3, а). Они расположены таким образом, что между внутренней поверхностью наружного конуса и внешней поверхностью внутреннего конуса имеется узкое кольцевое

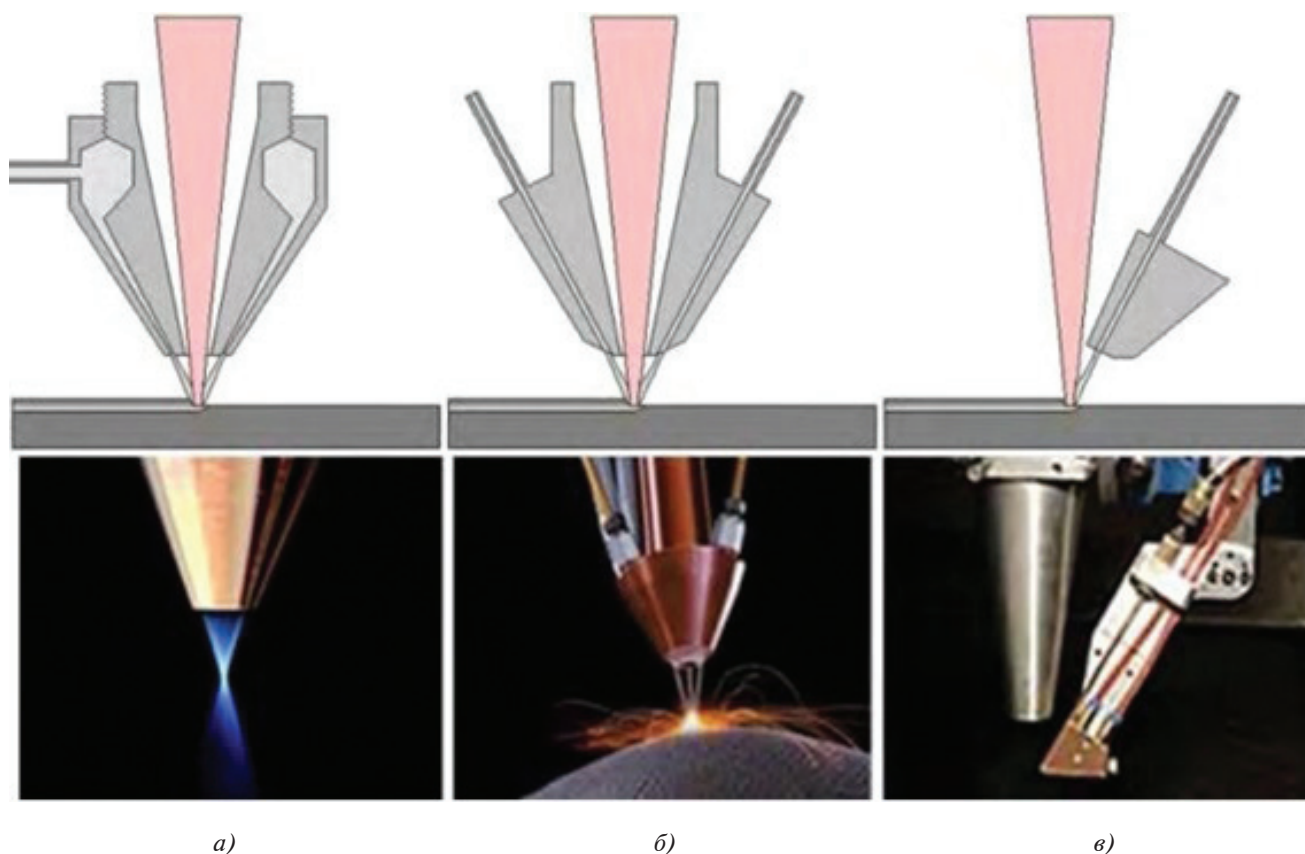


Рис. 3. Сопло с коаксиальным кольцевым каналом (а), струйное коаксиальное сопло с несколькими потоками порошка (б) и сопло с боковой подачей порошка (в) [21, 27]

пространство. Порошок сплавляемого материала поступает в кольцевое пространство через несколько точек ввода и под давлением газа транспортируется к выходному кольцевому отверстию. Выходящий из сопла порошок образует полый конус с вершиной в точке фокуса, расположенной на некотором расстоянии от среза сопла. Лазерный луч проходит через центральное отверстие. Через это же отверстие коаксиально лазерному лучу проходит также инертный газ, служащий, во-первых, для защиты ванны расплава от окружающей среды, а, во-вторых, для создания избыточного давления с целью исключения попадания порошка и дыма на внутренние оптические элементы.

Путем правильного выбора размера порошка и величины зазора в кольцевом пространстве, бокового положения конуса и расхода газа можно осуществить весьма тонкую фокусировку подачи порошка и обеспечить возможность создания при лазерном сплавлении элементов конструкции заготовки толщиной (либо шириной) до 0,5 мм. Вместе с тем следует отметить, что сопло этого типа является достаточно хрупким и может эффективно использоваться при мощности ла-

зерного источника тепла, не превышающей 1000 Вт. При большей мощности теплового источника возможен перегрев сопла и оплавление его тонких конических стенок на срезе. Кроме того, при соприкосновении сопла с заготовкой возможна деформация его краёв, что приводит к нарушению фокусировки подачи порошка [27].

#### **Струйные коаксиальные сопла с несколькими потоками порошка**

Эти сопла обычно изготавливаются из цельного прутка меди или латуни и выполняются с центральным отверстием для прохождения лазерного луча и наклонными отверстиями, просверленными под фиксированным углом, для подачи порошка. При продувке порошка через указанные отверстия газопорошковые потоки сходятся на фиксированном расстоянии от среза сопла (рис. 3,б). Поскольку сопло этого типа изготавливается из цельного куска материала, то в нём нет тонкостенных участков, которые могут расплавиться при наличии лазерного источника большой мощности или деформироваться под воздействием внешней нагрузки, а также отсутствуют регулируемые части, способные смещать-

ся друг относительно друга. Это делает возможным использование сопла с несколькими газопорошковыми потоками при ПЛС заготовок на установках, оснащённых лазерами большой мощности, и на режимах с высокой скоростью выращивания.

### Сопла с боковой подачей порошка

Эти сопла обычно используются в АТ, в которых требуется только одно направление сплавления (рис. 3, в), например при нанесении покрытия на вращающиеся валы. Сопла с боковой подачей порошка позволяют благодаря созданию оптимальных условий его подачи в ванну расплава обеспечить максимальную эффективность и качество наплавки. Так, при подаче порошка на переднюю кромку ванны расплава, как видно из рис. 1, происходит его полное расплавление, а при вводе порошка со стороны задней кромки ванны расплава возможно попадание его части на затвердевшую дорожку, а не в ванну расплава, в результате чего снижаются эффективность процесса наплавки и качество поверхности заготовки.

### Устройство подачи порошка

Конструкция современных порошковых питателей для ПЛС металла, как правило, включает вращающийся диск с канавкой, в которую из бункера подается порошок. При этом массовый расход порошка будет определяться скоростью вращения диска. Истечению порошка из бункера способствует избыточное давление в 1,5 бара,

создаваемое инертным газом (аргоном), находящимся в бункере, он же защищает порошок от окисления. Бункеры большинства дозаторов порошка имеют обогреваемую рубашку, предохраняющую порошок от насыщения его влагой.

В процессе вращения диск с канавкой, заполненной порошком, проходит над выпускным отверстием (приемником порошка) и выдавливается в него инертным газом, находящимся под избыточным давлением. Гибкая антистатическая полимерная трубка обеспечивает перенос порошка из выпускного отверстия дозатора в сопло, откуда он подается в зону наплавки.

### Параметры процесса ПЛС и их влияние на качество формообразования

На процесс ПЛС и качество формообразования заготовок оказывают влияние значительное количество параметров (рис. 4). Поэтому постоянный контроль этих параметров является необходимым условием получения предсказуемых и повторяемых результатов при ПЛС.

В табл. 2 представлены основные параметры и свойства, которыми характеризуется качество выращенных заготовок при использовании в технологическом процессе метода прямого лазерного сплавления, а также дефекты, сопровождающие данный процесс.

### Возможные дефекты, имеющие место при ПЛС

*Растрескивание.* При формообразовании заготовок методом ПЛС и последующей термической обработке в них могут возникать дефекты,

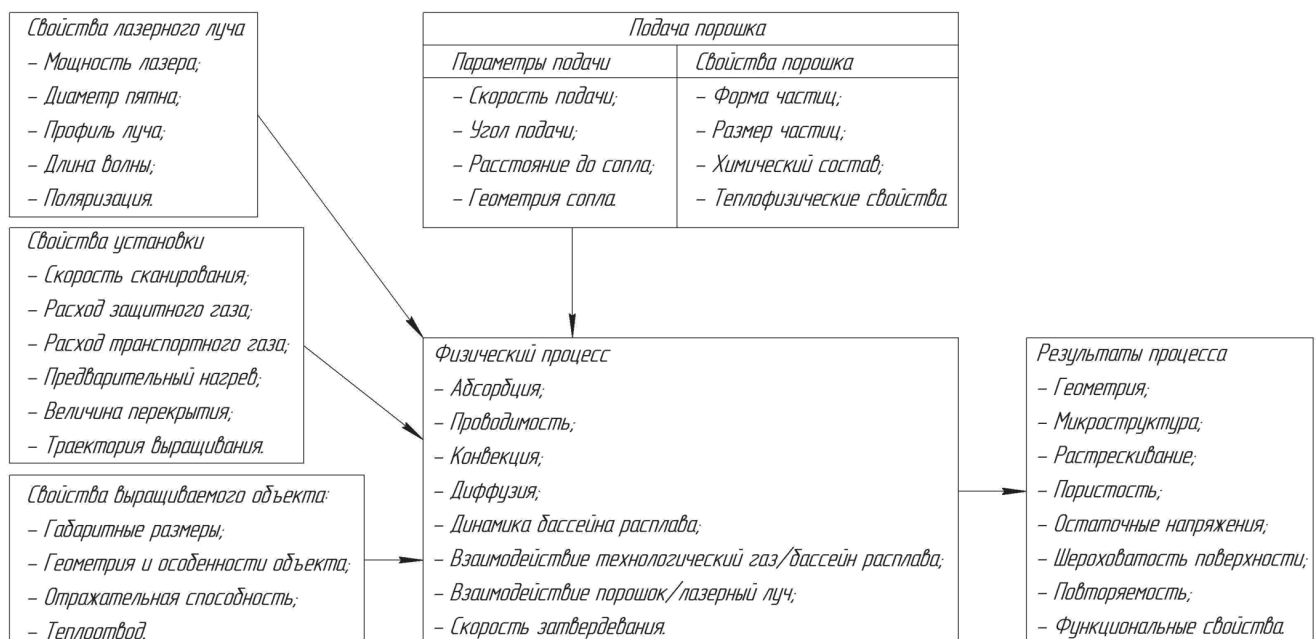


Рис. 4. Параметры, влияющие на лазерное сплавление металла [44]



Таблица 2

Параметры и свойства, характеризующие качество заготовок, и дефекты при ПЛС

Механические и эксплуатационные свойства	Геометрические параметры	Химический состав, структура и фазовое состояние	Дефекты
Предел прочности при растяжении	Точность размеров	Химический состав	Остаточные напряжения
Распределение твердости	Отклонения формы	Однородность	Деформации
Износостойкость	Волнистость поверхности	Размер зерна	Трещины
Коррозионная стойкость	Шероховатость поверхности	Микроструктура	Пористость

указанные в табл. 2. Как видно из табл. 2, одним из дефектов является трещинообразование. В зоне роста трещины, независимо от того, развивается она с поверхности или же внутри объема материала, формируются значительные остаточные напряжения, которые под действием знакопеременных нагрузок, воздействующих на деталь, способствуют её дальнейшему интенсивному росту, приводящему в конечном итоге к разрушению детали. В связи с усложнением конфигурации деталей, входящих в состав изделия, в частности деталей ГТД, становится все труднее получать заготовки со сложным фасонным профилем без наличия трещин того или иного типа.

В целом можно выделить четыре основные причины, приводящие к появлению трещин (рис. 5):

- растрескивание при затвердевании (взаимодействие солидус—ликвидус);
- ликвация границ зерен;
- падение пластичности;
- растрескивание под действием деформации.

В начале 1950-х годов W.S. Pellini предложил «теорию деформации», объясняющую образование трещин при затвердевании [46]. Согласно данной теории зерна затвердевающего металла разделены сплошной жидкой пленкой. Когда температура затвердевающего металла приближается к температуре ликвидуса, то в результате усадки металла возникает напряженное состояние между зернами и относительно слабые границы «твердое тело/жидкость» раздвигаются, образуя межзеренный разрыв.

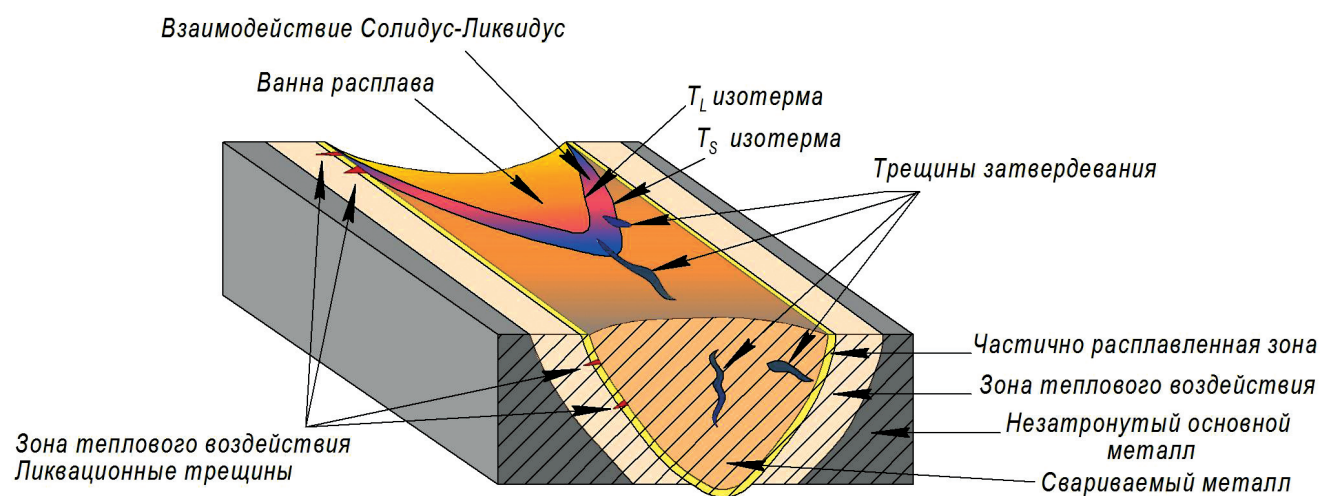


Рис. 5. Схематическое изображение различных типов трещин, которые могут образоваться во время сварки [45]

Теория усадочной хрупкости, представленная в 1948 г. W.I. Pumphrey и P.H. Jennings [47], предполагает, что вновь образованные дендриты не способны выдерживать деформацию во время затвердевания. По их мнению, это связано с тем, что температурный диапазон, при котором происходит растрескивание при затвердевании, находится между температурой солидуса и температурой когерентности, т.е. температурой, при которой встречаются дендриты. Поэтому, если в этом диапазоне температур критическая деформация в дендритах превышена, а жидкий металл для заполнения дефектов отсутствует, то образуются трещины затвердевания. А это, в свою очередь, свидетельствует о том, что сплавы, имеющие широкий диапазон температур затвердевания, более склонны к растрескиванию при затвердевании.

**Пористость.** К появлению или увеличению пористости при формообразовании заготовок или деталей методом ПЛС могут привести следующие причины:

1) захват пузырьков газа в ванне расплава во время затвердевания, например по причинам чрезмерного перемешивания ванны расплава, пористости в порошковом сырье или испарении легирующих элементов, приводящий к образованию газовых пор [48];

2) быстрое затвердевание ванны расплава, приводящее к неполному выходу газа из жидкого металла [48];

3) образование усадочных пустот в результате затвердевания образовавшихся карманов жидкости отдельно от оставшегося расплава [48].

4) неправильная подготовка поверхности, что может быть причиной загрязнения ванны расплава, оказывающей существенное влияние на поверхностное натяжение и сцепление покрытия с основанием;

5) увеличение высоты наплавляемых дорожек, приводящее при одинаковом уровне их перекрытия к росту объема пространства между дорожками [48].

**Деформации и остаточные напряжения.** Хотя ПЛС является более низкотемпературным процессом по сравнению, например, с дуговой сваркой, тем не менее быстрое плавление подложки лазерным лучом приводит к очень высоким температурным градиентам, которые, в сочетании с разными комбинациями сплавляемого материала и подложки, могут вызывать термические напряжения, нередко служащие причиной пластических деформаций. Следует также отме-

тить, что появившиеся после формообразования заготовки остаточные напряжения во многих случаях служат причиной возникновения трещин [50, 51, 52].

### **Преимущества и недостатки процесса ПЛС металлов и сплавов**

К преимуществам процесса ПЛС можно отнести следующее:

— лазерный луч обладает гораздо более высокой плотностью тепловой энергии по сравнению с плотностью энергии при других методах плавления, например при плавлении посредством электрической дуги. А это означает, что он способен осуществлять плавление и сплавление материала без перегрева подложки и наплавляемого материала, т.е. уменьшить зону термического влияния, снизить изменения микроструктуры материала подложки и геометрической формы заготовки;

— высокая фокусирующая способность лазерного источника позволяет создавать достаточно точные заготовки и детали со стенкой толщиной менее 0,5 мм;

— возможность управления мощностью лазера, плотностью теплового потока и, следовательно, микроструктурой наплавляемого материала позволяет применять процесс ПЛС для ремонта лопаток турбин из монокристаллического никелевого жаропрочного сплава путем наплавки, которую другими методами осуществить либо чрезвычайно сложно, либо невозможно;

— быстрый нагрев и охлаждение ванны расплава в совокупности с сравнительно малым его объемом гарантируют небольшой размер зародышевых зерен с меньшей сегрегацией легирующих элементов по сравнению с процессами литья и дуговой сварки.

К недостаткам процесса ПЛС можно отнести следующее:

— высокая стоимость оборудования препятствует широкому использованию процесса ПЛС в промышленности;

— невысокий уровень совпадения механических свойств заготовок, изготовленных на различных установках ПЛС, из различных партий порошка при идентичных условиях их формообразования, в определенной мере снижает доверие к данной технологии. Частично это обусловлено различиями в гранулометрическом составе, морфологии, химическом составе порошка, методах распыления и т.д.;

— ограничен перечень порошкообразных материалов для процесса ПЛС, помимо того что они малодоступны, наблюдается также их разброс по качеству;

— связь между условиями наплавки материалов и механическими свойствами заготовок до конца не изучена;

— не просто выращивать сложные изделия с внутренними полостями или выступами.

— относительно низкая скорость наплавки по сравнению с традиционными дуговыми процессами в сочетании с высокой стоимостью оборудования делает процесс ПЛС дорогостоящим.

## Выводы

1. Приведен обзор методов аддитивного производства, используемых в машиностроении, и дана их классификация в зависимости от источника энергии и формы исходного материала. Рассмотрены достоинства, которыми обладают аддитивные технологии по сравнению с традиционными методами, и показана их привлекательность для производства заготовок деталей и сборочных единиц изделий аэрокосмической отрасли.

2. Представлен положительный опыт использования аддитивных технологий для изготовления заготовок из жаропрочных труднообрабатываемых сплавов, в том числе методом прямого лазерного сплавления. Приведены примеры успешного использования метода ПЛС как непосредственно для получения заготовок, так и в гибридном, совмещенном с субтрактивными методами, технологическом процессе изготовления сложнопрофильных деталей с применением многоосевых манипуляторов.

3. Рассмотрены основные составляющие установки ПЛС, влияющие на качество получаемых заготовок. Описаны существующие конструкции сопел, используемые для подачи порошка в зону сплавления в установках для ПЛС. Указаны их достоинства и недостатки, а также условия применения. Описан принцип работы современных порошковых питателей для технологии ПЛС металла. Представлены параметры, характеризующие процесс ПЛС и влияющие на качество формообразования заготовок. Выполнен анализ дефектов, сопровождающих данный процесс, и определены возможные причины их появления. Рассмотрены преимущества и недостатки процесса ПЛС металлических порошков.

## Библиографический список

1. *Arunachalam R., Mannan M.A.* Machinability of nickel-based high temperature alloys // *Machining Science and Technology*. 2000. Vol. 4. No. 1, pp. 127-168. DOI: 10.1080/10940340008945703
2. *Khaimovich A.I., Balaykin A.V., Kondratiev A.I.* Methodology of rheological material properties phenomenological modeling at high speed cutting by reverse analysis // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9. No. 11, pp. 753-760. DOI: 10.36478/rjasci.2014.753.760
3. *Vdovin R.A.* Improving the quality of the manufacturing process of turbine blades of the gas turbine engine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399. No. 4. URI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/4/044035>
4. *Bi Z., Qin H., Dong Z.* et al. Residual Stress Evolution and Its Mechanism During the Manufacture of Superalloy Disk Forgings // *Acta Metallurgica Sinica*. 2019. Vol. 55. No. 9, pp. 1160-1174. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.00089
5. *Saleil J., Mantel M., Le Coze J.* Stainless steels making: History of production processes developments. Part III. Casting methods, hot and cold forming processes // *Matériaux & Techniques*. 2020. Vol. 108. No. 1, p. 105. DOI: 10/gg4m5x
6. *Balyakin A.V., Dobryshkina E.M., Vdovin R.A., Alekseev V.P.* Rapid Prototyping Technology for Manufacturing GTE Turbine Blades // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. No. 2. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022025
7. *Balaykin A.V., Bezsonov K.A., Nekhoroshev M.V., Shulepov A.P.* Developing Parametric Models for the Assembly of Machine Fixtures for Virtual Multiaxial CNC Machining Centers // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 302. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012009
8. *Маггеррамова Л.А., Васильев Б.Е.* Влияние ориентации монокристалла на напряженно-деформированное состояние и прочность лопаток газовых турбин // *Вестник Московского авиационного института*. 2012. Т. 19. № 5. С. 89-97.
9. *Quested P., McLean M.* Solidification morphologies in directionally solidified superalloys // *Materials Science and Engineering*, 1984. Vol. 65. No. 1, pp. 171-180. DOI: 10.1016/0025-5416(84)90210-6
10. *Donachie M.J., Donachie S.J.* Superalloys: A technical guide. — 2nd edition. — ASM international, 2002. — 439 p.
11. *Maldini M., Marchionni M., Nazmy M.* et al. Creep and fatigue properties of a directionally solidified nickel base super alloy at elevated temperature // *8th International Symposium on Superalloys (22-26 September 1996, Seven Springs Mountain)*, pp. 327-334. URI: [https://www.tms.org/superalloys/10.7449/1996/Superalloys\\_1996\\_327\\_334.pdf](https://www.tms.org/superalloys/10.7449/1996/Superalloys_1996_327_334.pdf)

12. *Busquet F., Forrat F.* Method for the manufacture of single crystals. Patent US3584676A, 15.06.1971.
13. *Higginbotham G.J.S., Marjoram J.R., Horrocks F.J.* Method of and mould for making a cast single crystal. Patent US4469161A, 04.09.1984.
14. *Климов В.Г., Никитин В.И., Никитин К. В., Жаткин С.С., Когтева А.В.* Применение износостойких естественных композитов в технологии ремонта и модифицирования лопаток ротора газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 251-266.
15. *Хрящев И.И., Данилов Д.В., Логунов А.В.* Разработка экономнолегированного никелевого жаропрочного сплава для рабочих лопаток газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 205-218.
16. *Sotov A.V., Agapovichev A.V., Smelov V.G. et al.* Investigation of the IN-738 super alloy microstructure and mechanical properties for the manufacturing of gas turbine engine nozzle guide vane by selective laser melting // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 107. No. 5-6, pp. 2525-2535.
17. Amaero — Additive Manufacturing of Aerospace Equipment. URI: <https://www.monash.edu/industry/success-stories/amaero>
18. Commercial aircraft propulsion and energy systems research: Reducing global carbon emissions // Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions. 2016, 122 p. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: 10.17226/23490
19. *Pollok T.M., Tin S.* Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties // Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22. No. 2, pp. 361-374. DOI: 10.2514/1.18239
20. *Hosseini E., Popovich V.A.* A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 30. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100877
21. *Associates W., Wohlers T.T.* Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing. State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report. 2013: Wohlers Associates.
22. TWI-Global. 2014. Revolutionary development cuts manufacturing times using Laser Metal Deposition. URI: <http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/revolutionary-development-cuts-manufacturing-times-using-laser-metal-deposition-583/>
23. *Bourell D., Beaman J.J., Leu M.C. et al.* A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead // US-Turkey Workshop on Rapid Technologies (24–24 September 2009).
24. *Lyons B.* Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook // Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2011 Symposium. 2011.
25. Additive manufacturing: Pursuing the promise. — US Department of Energy, 2012.
26. *Allen J.* The business case for additive manufacture // Laser materials processing in aerospace and precision manufacturing. 2005. Rolls Royce, Derby.
27. *Schneider M.F.* Laser cladding with powder, effect of some machining parameters on clad properties. — PhD Thesis. Proefschrift Universiteit Twente, Enschede, 1998.
28. *Bremen S., Meiners W., Diatlov A.* Selective Laser Melting // Laser Technik Journal. 2012. Vol. 9. No. 2, pp. 33-38. DOI: 10.1002/latj.201290018
29. *Télez A.G.M.* Fibre laser metal deposition with wire: Parameters study and temperature control. PhD thesis, University of Nottingham, 2010. URI: <http://eprints.nottingham.ac.uk/id/eprint/12812>
30. *Taminger K.* Electron beam additive manufacturing: State-of-the-Technology, challenges & opportunities // Direct digital manufacturing workshop (11-12 May 2010; Solomons, MD). URI: <http://cmappublic3.ihmc.us/rid=1P89GM82G-1Y2FGKT-18DP/EBM%20Overview%20%26%20Challenges.pdf>
31. *Baufeld B., van der Biest O., Gault R., Ridgway K.* Manufacturing Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2011. Vol. 26. DOI: 10.1088/1757-899X/26/1/012001
32. *Магеррамова Л.А., Крафт Е.П., Ясинский В.В.* Конструктивно-технологическое моделирование биметаллических блисков для газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 82-88.
33. GE aviation signs additive manufacturing cooperative agreement with Sigma Labs. In-Process Inspection Technology Progresses Additive Production Speeds. 2013. URI: [http://www.geaviation.com/press/other/other\\_20130524.html](http://www.geaviation.com/press/other/other_20130524.html)
34. *Gasser A., Backes G., Kelbassa I. et al.* Laser Additive Manufacturing // Laser Technik Journal. 2010. Vol. 7. No. 2, pp. 58-63. DOI: 10.1002/latj.201090029
35. *Leyens C., Beyer E.* Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition // Laser Surface Engineering: Processes and Applications. 2015, pp. 181-192. DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8
36. *Ocylok S., Alexeev E., Mann S. et al.* Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring // Physics Procedia. 2014. Vol 56, pp. 228-238. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.167
37. *Turichin G.A., Somonov V.V., Babkin K.D. et al.* High-Speed Direct Laser Deposition: Technology, Equipment and Materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 125. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012009
38. *Shamsaei N., Yadollahi A., Bian L. et al.* An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing;

- Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control // Additive Manufacturing. 2015. Vol. 8, pp. 12-35. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.002
39. Институт лазерных и сварочных технологий СПбМТУ, <http://ilwt-stu.ru>
  40. Jones J.B., McNutt P., Tosi R., Perry C., Wimpenny D. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine // 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (2012 Austin, TX, USA, University of Texas), pp. 821-827. URI: <http://hdl.handle.net/2086/7552>
  41. Qi H., Azer M., Singh P. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010. Vol. 48, pp. 121-131. DOI: 10.1007/s00170-009-2265-7
  42. Gregori A., Bertaso D. Welding and Deposition of Nickel Superalloys 718, Waspaloy and Single Crystal Alloy CMSX-10 // Welding in the World. 2007. Vol. 51, pp. 34-47. DOI: 10.1007/BF03266607
  43. Климов В.Г. Применение лазерной импульсной наплавки при разработке технологии восстановления рабочих лопаток турбины газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 170-179.
  44. Theiler C., Seefeld T., Sepold G. Deposition of graded metal matrix composites by laser beam cladding. Bias Bremen Institute of Applied Beam Technology, Germany, 2005.
  45. Yushchenko K.A., Savchenko V.S. Classification and Mechanisms of Cracking in Welding High-Alloy Steels and Nickel Alloys in Brittle Temperature Ranges // Böllinghaus T., Herold H., Cross C.E., Lippold J.C. (eds) Hot Cracking Phenomena in Welds II. Springer, Berlin, Heidelberg. 2005, pp. 95-114. DOI: 10.1007/978-3-540-78628-3\_6
  46. Pellini W.S. Strain theory of hot tearing // Foundry. 1952. Vol. 80, pp. 125-199.
  47. Pumphrey W.I., Jennings P.H. A consideration of the nature of brittleness and temperature above the solidus in castings and welds in aluminum // Journal of the Institute of Metals. 1948. Vol. 75, pp. 235-236.
  48. Ashan M.N. Modelling and analysis of Laser Direct Metal deposition of Ti-6Al-4V. PhD Thesis. University of Manchester. 2011.
  49. Cross C.E. On the Origin of Weld Solidification Cracking // Böllinghaus T., Herold H., Cross C.E., Lippold J.C. (eds) Hot Cracking Phenomena in Welds II. Springer, Berlin, Heidelberg. 2005, pp. 3-18. DOI: 10.1007/3-540-27460-X\_1
  50. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Исследование влияния остаточных напряжений в зоне расположения трещины на скорость ее роста при циклическом нагружении // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 1. С. 104-110.
  51. Lawrence J.R., Waugh D. Laser surface engineering: Processes and Applications. — 1st Edition. — Woodhead Publishing, 2014. — 718 p.
  52. The ABC's of Arc Welding and Inspection // Kobelco welding worldwide. 2015, 93 p. URI: [http://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC\\_2006-03.html](http://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC_2006-03.html)

## DIRECT LASER FUSION APPLICATION FOR POWDERS FROM HEAT RESISTANT ALLOYS IN ENGINE BUILDING

**Balyakin A.V.\* , Skuratov D.L.\*\* , Khaimovich A.I.\*\*\* , Oleinik M.A.\*\*\*\***

*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev  
(Samara University),*

*34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia*

*\* e-mail: balaykinav@ssau.ru*

*\*\* e-mail: skuratov-sdl56@ya.ru*

*\*\*\* e-mail: berill\_samara@bk.ru*

*\*\*\*\* e-mail: oleynik1997@mail.ru*

### Abstract

At present, heat-resistant nickel-based alloys have found a very wide application in of energy and aerospace engineering products manufacturing. Their share in the total mass of modern aviation gas turbine engines is particularly large, since they are the

preferred materials for production of disks, blades, combustion chambers, and turbine housings.

The article presents an overview of additive manufacturing methods actively employed in the aircraft and rocket engine parts manufacturing. Their

classification is presented in dependence on the energy source employed and the source material shape. The advantages of additive technologies in comparison with conventional methods of forming parts and products are described, technology of the parts blanks manufacturing from heat-resistant alloys by direct laser fusion of metal powders is considered. Examples of the of additive technologies successful application in the aerospace industry in the production of various parts, both for the production of blanks, and in the hybrid, combined with subtractive methods, the technological process of manufacturing complex parts using multi-axis manipulators are presented.

The article considers the main components of the direct laser fusion (DLF) plant, affecting the quality of the resulting workpieces. It describes the existing nozzle designs employed for feeding powder to the fusion zone in DLF installations. Their advantages and disadvantages, as well as conditions for their application are described. The article describes the principle of operation of modern powder feeders for the DLF technology. Parameters characterizing the DLF process and affecting the quality of workpieces forming are presented. Analysis of the defects accompanying of this process was performed, and possible causes of their occurrence were determined.

The advantages and disadvantages of the DLF process of metal powders are described. The main advantages of the DMD process are as follows:

- the laser beam is capable to perform melting and sintering of the material without overheating the substrate and deposited material, i.e., decrease the zone of thermal impact, and diminish changes in the microstructure of the material;

- the high focusing capacity of the laser source allows creating sufficiently accurate workpieces and parts with a wall of less than 0.5 mm;

- the ability to control the laser power, the heat flux density and, consequently, the microstructure of the deposited material allows the DLF process application for repairing complex parts made of a single-crystal nickel heat-resistant alloy.

The disadvantages of the DLF process include the following:

- a low level of mismatch of mechanical properties of the blanks made at different DLF plants from different powder batches under identical conditions of their forming;

- high cost of equipment, which prevents the widespread application of the DLF process in the industry;

- a limited list and low availability of powdery materials, as well as a large range of their quality spread;

- the relationship between the surfacing conditions of powder materials and the mechanical properties of the workpieces is not fully understood.

**Keywords:** additive manufacturing, direct metal deposition, heat-resistant alloy, deposition defects.

## References

1. Arunachalam R., Mannan M.A. Machinability of nickel-based high temperature alloys. *Machining Science and Technology*, 2000, vol. 4, no. 1, pp. 127-168. DOI: 10.1080/10940340008945703
2. Khaimovich A.I., Balaykin A.V., Kondratiev A.I. Methodology of rheological material properties phenomenological modeling at high speed cutting by reverse analysis. *Research Journal of Applied Sciences*, 2014, vol. 9, no. 11, pp. 753-760. DOI: 10.36478/rjasci.2014.753.760
3. Vdovin R.A. Improving the quality of the manufacturing process of turbine blades of the gas turbine engine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, no. 4. URI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/4/044035>
4. Bi Z., Qin H., Dong Z. et al. Residual Stress Evolution and Its Mechanism During the Manufacture of Superalloy Disk Forgings. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, vol. 55, no. 9, pp. 1160-1174. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.00089
5. Saleil J., Mantel M., Le Coze J. Stainless steels making: History of production processes developments. Part III. Casting methods, hot and cold forming processes. *Matériaux & Techniques*, 2020, vol. 108, no. 1, p. 105. DOI: 10/gg4m5x
6. Balyakin A.V., Dobryshkina E.M., Vdovin R.A., Alekseev V.P. Rapid Prototyping Technology for Manufacturing GTE Turbine Blades. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, no. 2. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022025
7. Balaykin A.V., Bezsonov K.A., Nekhoroshev M.V., Shulepov A.P. Developing Parametric Models for the Assembly of Machine Fixtures for Virtual Multiaxial CNC Machining Centers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 302. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012009
8. Magerramova L.A., Vasilyev B.E. The influence of crystal orientation on the stress-strain state and strength of a turbine blade. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 5, pp. 89-97.
9. Queded P., McLean M. Solidification morphologies in directionally solidified superalloys. *Materials Science and Engineering*, 1984, vol. 65, no. 1, pp. 171-180. DOI: 10.1016/0025-5416(84)90210-6
10. Donachie M.J., Donachie S.J. *Superalloys: A technical guide*. 2nd edition. ASM international, 2002, 439 p.

11. Maldini M., Marchionni M., Nazmy M. et al. Creep and fatigue properties of a directionally solidified nickel base super alloy at elevated temperature. *8th International Symposium on Superalloys (22-26 September 1996, Seven Springs Mountain)*, pp. 327-334. URI: [https://www.tms.org/superalloys/10.7449/1996/Superalloys\\_1996\\_327\\_334.pdf](https://www.tms.org/superalloys/10.7449/1996/Superalloys_1996_327_334.pdf)
12. Busquet F., Forrat F. *Method for the manufacture of single crystals*. Patent US3584676A, 15.06.1971.
13. Higginbotham G.J.S., Marjoram J.R., Horrocks F.J. *Method of and mould for making a cast single crystal*. Patent US4469161A, 04.09.1984.
14. Klimov V.G., Nikitin V.I., Nikitin K.V., Zhatkin S.S., Kogteva A.V. Wear-resistant composites application in repair and modification technology of the GTD rotor blades. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 251-266.
15. Khryashchev I.I., Danilov D.V., Logunov A.V. Developing a sparingly doped high-temperature nickel alloy for gas turbine blades. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 205-218.
16. Sotov A.V., Agapovichev A.V., Smelov V.G. et al. Investigation of the IN-738 super alloy microstructure and mechanical properties for the manufacturing of gas turbine engine nozzle guide vane by selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, no. 5-6, pp. 2525-2535.
17. *Amaero - Additive Manufacturing of Aerospace Equipment*. URI: <https://www.monash.edu/industry/success-stories/amaero>
18. Commercial aircraft propulsion and energy systems research: Reducing global carbon emissions. In *Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions*, 2016, 122 p. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: 10.17226/23490
19. Pollok T.M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 361-374. DOI: 10.2514/1.18239
20. Hosseini E., Popovich V.A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 30. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100877
21. Associates W., Wohlers T.T. *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing*. State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report. 2013: Wohlers Associates.
22. *TWI-Global. 2014. Revolutionary development cuts manufacturing times using Laser Metal Deposition*. URI: <http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/revolutionary-development-cuts-manufacturing-times-using-laser-metal-deposition-583/>
23. Bourell D., Beaman J.J., Leu M.C. et al. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. *US-Turkey Workshop on Rapid Technologies (24-24 September 2009)*.
24. Lyons B. Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook. *Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2011 Symposium*. 2011.
25. *Additive manufacturing: Pursuing the promise*. US Department of Energy, 2012.
26. Allen J. The business case for additive manufacture. In *Laser materials processing in aerospace and precision manufacturing*. 2005, Rolls Royce, Derby.
27. Schneider M.F. *Laser cladding with powder, effect of some machining parameters on clad properties*. PhD Thesis. Proefschrift Universiteit Twente, Enschede, 1998.
28. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective Laser Melting. *Laser Technik Journal*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 33-38. DOI: 10.1002/latj.201290018
29. Téllez A.G.M. *Fibre laser metal deposition with wire: Parameters study and temperature control*. PhD thesis, University of Nottingham, 2010. URI: <http://eprints.nottingham.ac.uk/id/eprint/12812>
30. Taminger K. Electron beam additive manufacturing: State-of-the-Technology, challenges & opportunities. *Direct digital manufacturing workshop (11-12 May 2010; Solomons, MD)*. URI: <http://cmapspublic3.ihmc.us/rid=1P89GM82G-1Y2FGKT-18DP/EBM%20Overview%20%26%20Challenges.pdf>
31. Baufeld B., van der Biest O., Gault R., Ridgway K. Manufacturing Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2011, vol. 26. DOI: 10.1088/1757-899X/26/1/012001
32. Magerramova L.A., Kratt E.P., Yacinsky V.V. Structural technological designing of bimetallic blisk for gas turbines. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 82-88.
33. *GE aviation signs additive manufacturing cooperative agreement with Sigma Labs*. In-Process Inspection Technology Progresses Additive Production Speeds. 2013. URI: [http://www.geaviation.com/press/other/other\\_20130524.html](http://www.geaviation.com/press/other/other_20130524.html)
34. Gasser A., Backes G., Kelbassa I. et al. Laser Additive Manufacturing. *Laser Technik Journal*, 2010, vol. 7, no. 2, pp. 58-63. DOI: 10.1002/latj.201090029
35. Leyens C., Beyer E. Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition. *Laser Surface Engineering: Processes and Applications*, 2015, pp. 181-192. DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8
36. Ocylok S., Alexeev E., Mann S. et al. Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring. *Physics Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 228-238. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.167
37. Turichin G.A., Somonov V.V., Babkin K.D. et al. High-Speed Direct Laser Deposition: Technology, Equipment and Materials. *IOP Conference Series:*

- Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 125. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012009
38. Shamsaei N., Yadollahi A., Bian L. et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, 2015, vol. 8, pp. 12-35. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.002
  39. *Institute of Laser and Welding Technologies - ILWT*, <http://ilwt-stu.ru>
  40. Jones J.B., McNutt P., Tosi R., Perry C., Wimpenny D. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (2012 Austin, TX, USA, University of Texas)*, pp. 821-827. URI: <http://hdl.handle.net/2086/7552>
  41. Qi H., Azer M., Singh P. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 48, pp. 121-131. DOI: 10.1007/s00170-009-2265-7
  42. Gregori A., Bertaso D. Welding and Deposition of Nickel Superalloys 718, Waspaloy and Single Crystal Alloy CMSX-10. *Welding in the World*, 2007, vol. 51, pp. 34-47. DOI: 10.1007/BF03266607
  43. Klimov V.G. Implementing laser pulse buildup for GTE turbine rotor blades reconditioning process design development. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 170-179.
  44. Theiler C., Seefeld T., Sepold G. *Deposition of graded metal matrix composites by laser beam cladding*. Bias Bremen Institute of Applied Beam Technology, Germany, 2005.
  45. Yushchenko K.A., Savchenko V.S. Classification and Mechanisms of Cracking in Welding High-Alloy Steels and Nickel Alloys in Brittle Temperature Ranges. In Böllinghaus T., Herold H., Cross C.E., Lippold J.C. (eds) *Hot Cracking Phenomena in Welds II*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 95-114. DOI: 10.1007/978-3-540-78628-3\_6
  46. Pellini W.S. Strain theory of hot tearing. *Foundry*, 1952, vol. 80, pp. 125-199.
  47. Pumphrey W.I., Jennings P.H. A consideration of the nature of brittleness and temperature above the solidus in castings and welds in aluminum. *Journal of the Institute of Metals*, 1948, vol. 75, pp. 235-236.
  48. Ashan M.N. *Modelling and analysis of Laser Direct Metal deposition of Ti-6Al-4V*. PhD Thesis. University of Manchester, 2011.
  49. Cross C.E. On the Origin of Weld Solidification Cracking. In Böllinghaus T., Herold H., Cross C.E., Lippold J.C. (eds) *Hot Cracking Phenomena in Welds II*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 3-18. DOI: 10.1007/3-540-27460-X\_1
  50. Potapov S.D., Perepelitsa D.D. Research of influence of residual tension in the zone of the arrangement of the crack on the rate of its growth at cyclic loading. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 104-110.
  51. Lawrence J.R., Waugh D. *Laser surface engineering: Processes and Applications*. 1st Edition. Woodhead Publishing, 2014, 718 p.
  52. *The ABC's of Arc Welding and Inspection*. Kobelco welding worldwide, 2015, 93 p. URI: [http://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC\\_2006-03.html](http://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC_2006-03.html)