



ЧТО ТАМ НОВЕньКОГО В ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ?

Н. Л. Истомина, АО "РИЦ "ТЕХНОСФЕРА", Москва

В Санкт-Петербурге 17–19 сентября 2018 года прошла IX конференция "Лучевые технологии и лазерные приложения". Конференция пользуется авторитетом среди специалистов, работающих в области технологий взаимодействия лазерных и плазменных пучков с материалами. Она прекрасно зарекомендовала себя тем, что программа каждого научного мероприятия, проходящего в ее рамках, лаконично отражает огромный поток информации по промышленным лучевым технологиям и проблемам, сопутствующим их внедрению.

Конференция "Лучевые технологии и лазерные приложения" проходит раз в три года – как раз этот промежуток времени оказывается оптимальным, чтобы из множества технологических предложений, наводнивших страницы научных журналов и трудов конференций, выделить силуэт промышленных предпочтений. Под знаком конференции уже в девятый раз собрались разработчики и пользователи технологий и промышленного оборудования, материаловеды, а также студенты – всего 200 участников из Казани, Москвы, Санкт-Петербурга, Тулы, Перми, Даугавпилса, Ганновера, Берлина, Новосибирска и Минска. Было представлено 120 докладов, обсуждения велись в рамках секций: физические основы и математическое моделирование лучевых технологий; оборудование и технологии сварки, наплавки и теплового воздействия; оборудование и технологии резки, сверления и поверхностной обработки; лучевые технологии в Индустрии 4,0; оборудование и технологии в аддитивном производстве.

Прорывные решения в технологиях использования лазерных и плазменных пучков сегодня отсутствуют. Доклады пленарной сессии очертили круг основных вопросов, предназначенных к обсуждению, доклады второго дня были

посвящены уточнению параметров технологических процессов и воздействующих внешних полей, отработке оптимальных режимов работы промышленного оборудования. Участники конференции отметили несколько докладов. Среди них был доклад группы авторов из МГТУ им. Н.Э. Баумана "Эффект лазерной ударной обработки сварных соединений". Выступал профессор И. Шиганов, он показал результаты исследований, свидетельствующие о том, что в сварочных соединениях алюминиевых и титановых сплавов при ударном лазерном воздействии растягивающие напряжения снижаются в 2–3 раза. При этом энергия в импульсе варьировалась в диапазоне 180–400 МДж, длительность импульса 10 нс. Доклад Х. Каримова из компании IXUN Lasertechnik был посвящен положительным эффектам, возникающим при использовании конкретных оптических узлов лазерных головок в лазерных процессах упрочнения, наплавки и сплавления. Эта информация была интересна разработчикам оборудования.

Но самые интересные вопросы, при обсуждении которых завязалась дискуссия, вызвали доклады третьего дня, посвященные материаловедческим проблемам применения аддитивных технологий. Состоялась впечатляющая полемика,



когда вопросы и аргументы, перебрасывались друг другу, как мяч во время спортивных соревнований. Столкновением двух взглядов, двух подходов к развитию этих технологий заинтересовала участников конференции. Одно мнение имели разработчики и интеграторы оборудования (например представители компании ИЛИСТ или Национального технического университета республики Беларусь), другое мнение выражали материаловеды (например участники конференции от компании "Композит"). Дискуссия была чрезвычайно интересна и полезна, она развернулась вокруг проблемы появления дефектов в ходе создания деталей аддитивными методами и возможностей их снижения. Разработчики оборудования прямо говорили об устаревших материалах, предлагаемых производителям производителей порошков, жаловались на отсутствие порошковых материалов, удовлетворяющих требованиям пластичности при производстве конкретных целевых изделий, на отсутствие информации о возможных деформациях изделия при его создании методом прямой лазерной наплавки или лазерного спекания. Материаловеды упрекали производителей в умалчивании проблем и игнорировании результатов проведенных материаловедческих НИОКР. Состоявшиеся дискуссии обогатили знаниями обе стороны.

В докладе "Особенности применения аддитивных технологий в производстве деталей газотурбинных двигателей" (докладчик Л. Магеримова, ЦИАМ, Москва) рассматривались возможности повышения технических характеристик, связанных с достижением топливной экономичности дисков газотурбинных двигателей, при их проектировании. В докладе были приведены результаты совместной работы, выполняемой ЦИАМ и ИЛИСТ.

Диски турбин относятся к основным деталям двигателей, нарушение которых приводит к ката-

строфе. Облегченная конструкция диска в состоянии поднять скорость вращения. Для придания конструкции высокой прочности нужны новые материалы и новые технологии. Проектирование включало технологическую оптимизацию по 34 параметрам, среди которых и габаритные размеры, в том числе радиусы закругления, и силовые характеристики эксплуатации. Минимизация массы за счет создания полого диска турбины позволила бы поднять долговечность эксплуатации изделия до 13000 циклов. Однако встает вопрос о технологии создания полого диска. Можно было создать отдельно две части диска и затем сварить их по ободу или сразу выполнить SLM-методом. Первый способ предполагал создание диска из двух частей с их последующей сваркой. Части диска вырастили из никелевого порошкового сплава ЭИ698 П. Время процесса заняло 11 часов 48 минут. Последующие исследования структуры показали большое количество протяженных трещин и наличие конгломератов порошка в готовом изделии. Для снижения пористости использовали стандартную процедуру газотермического изостатического прессования (ГИП). Затем для повышения чистоты поверхности использовали электрохимическое полирование. Если до обработки поверхность заготовки имела $R_z=20$, то после обработки шероховатость поверхности составила $R_z=6$. Сварка двух частей диска была произведена на технологической лазерной установке производства "ИРЭ-Полус" Laser Weld 10R120. Расчетная разрушающая частота вращения газотурбинного диска составляла 33500 об./мин. При испытаниях образца, созданного с помощью аддитивной технологии лазерного спекания, была достигнута частота 30299 об./мин.

Но специалистам известно, что сварка вносит нарушения в механические свойства. Поэтому был спроектирован иной технологический про-



цесс – создание единого полого диска с применением метода лазерного спекания. При его изготовлении использовалось оборудование корейской компании InssTec.inc., результаты испытаний находятся в стадии обработки.

Каждая компания, создающая установку аддитивного выращивания, делает ее под конкретное целевое изделие, комбинируя для его дальнейшей модификации ширину пучка, мощность лазера и скорость сканирования пучком. От формы профиля мощности излучения в сечении лазерного пучка и скорости сканирования зависит форма валика и производительность установки. Доклад "Поиск высокопроизводительной аддитивной технологии" (К. Бабкин, ИЛИСТ, Санкт-Петербург) был посвящен обзору производительности наиболее известных аддитивных машин, в которых для выращивания деталей используются металлические порошки. Машины VeAM Machines дают валик шириной от 0,8 до 2 мм. Производительность низкая – 100–400 г/час. При этом разумное время создания детали – 100 часов. Машина Insstek реализует метод селективного лазерного сплавления, дает валик шириной 0,5 мм, производительность 200 г/час. Производительность машин DMC Mori – 100 г/час.

Во всех установках размер изготавливаемой детали ограничен размерами камеры станка. Для выращивания больших деталей требуется увеличивать объем рабочей камеры. Однако в погоне за увеличением размеров выращиваемых изделий не стоит забывать, что чем больше размер детали, тем сложнее охладить изделие для предотвращения возникновения деформаций и тем сложнее очищать камеру от порошка.

В своих разработках технологического оборудования для аддитивного выращивания изделий из металлических порошков компания ИЛИСТ идет по пути повышения производительности, используя в качестве технологического инстру-

мента лазерную головку IPG D30 Wobble head. Так как компания реализует технологию лазерного спекания, то в своем оборудовании она стремится создавать лазерный пучок с равномерным распределением мощности в сечении пучка. Если же используется пучок с гауссовым распределением мощности, то это приводит к появлению подрезов на краях валиков при наплавке. Для устранения этой проблемы можно вставить в оптическую схему либо п-шейперы, либо сканирующие зеркала. Выбор решения зависит от разработчика оборудования. При работе с фокусируемым пучком предпочтение отдают п-шейперам, создающим плосковершинное распределение мощности в сечении пучка или распределение "перевернутый гаусс". При работе с расфокусированным пучком предпочтение отдают сканирующим зеркалам.

От конструкции сопла зависит защита ванны расплава, поэтому его конструкция заточивается под определенную задачу. Натурные эксперименты по выращиванию крупногабаритных деталей диаметром 2 м, на производство одного изделия которой идет до 12 кг порошка, показали уход размера за время выращивания на 2 см. При этом надо учесть, что производство детали идет 10 часов при одноразовом включении лазера. Как только делается перерыв в процессе лазерного выращивания, пусть даже в 15 минут, тут же размер уходит. Когда деталь осесимметричная, рассчитать ее деформацию легко, но все меняется, как только мы начинаем проектировать несимметричную деталь.

Отработке режимов плазменной сфероидизации порошков оксида циркония в промышленных масштабах был посвящен доклад группы авторов из Казанского технического университета им. А.Н.Туполева и Казанского авиационного института). Тетрагональная фаза циркония используется в защитных покрытиях. Защит-



ные керамика из оксида циркония ZrO_2 , допированного иридием, наносят на поверхности деталей плазменно-дуговым методом напыления. Порошки сферичной формы обладают высокими показателями текучести. ВИАМ выпускает 50 тонн в год порошка сферичного циркония, но потребность в нем гораздо выше. Поэтому разработка промышленных методов сфероидизации порошков оксида циркония актуальна. Сфероидизация происходит под действием последовательности процессов нагревания в плазме при температуре 7000K и последующего охлаждения, когда за счет действия сил поверхностного натяжения частицы приобретают сферическую форму.

Доклад "Влияние горячего изостатического прессования на микроструктуру и механические свойства никелевых сплавов ЭП741НП, предназначенных для SLM-технологий" (компания "Композит", Королев, Моск. обл.), был посвящен результатам разработки технологического процесса сфероидизации порошков никелевых сплавов методом плазменного центробежного распыления (PREP). Порошок ЭП741НП на основе Ni-сплавов широко используется в производстве для изготовления дисков двигателей. Никелевые жаропрочные сплавы имеют повышенные литейные свойства. В работе были представлены результаты исследования морфологии, гранулометрического состава, эволюции структуры и фазового состава порошка никелевого сплава после создания деталей SLS-методом. В SLS-оборудовании варьировались параметры лазерного инструмента: скорость сканирования и мощность излучения. Мощность лазера варьировалась от 150 до 200 Вт, скорость сканирования менялась от 99 до 1200 мм/с.

В полученных деталях образовывались карбиды, которые в мелкодисперсном состоянии укрепляют механические свойства сплавов, и наоборот, крупные гранулы карбидов способствуют зарождению трещин. Определены механические

свойства деталей, полученных из порошков: предел прочности 1357 МПа, предел текучести 1013 МПа. Было обнаружено, что при мощности лазерного излучения 165 Вт на границе зерен образуются карбиды, которые растут. Рост трещин наблюдался при мощности 135 Вт и скорости 900 мм/с. При мощности 175 Вт и скорости сканирования луча 1200 мм/с с подогревом детали до 900 °С удалось предотвратить последующее растрескивание. Для работы с порошками из никелевых сплавов надо повысить температуру подогрева. Сейчас на предприятии приступили к исследованию структуры материала при выращивании деталей по разным направлениям к основанию (углы варьируются от 0 до 90°).

В Казанском техническом университете на кафедре лазерных технологий развивают лазерно-акустические методы производства авиационных деталей из порошков нежелезистых и железосодержащих металлов методами прямого лазерного сплавления. В докладе А. Горюнова было показано, что большие скорости выращивания деталей ведут к росту порообразования. Акустическое воздействие на деталь из алюминиевого сплава при SLS-методе выращивания позволяет перемешивать поры. А если акустическое воздействие направлено снизу вверх, то - и вытеснить поры к поверхности, тогда поры формируются только в приграничной зоне.

У никелевых сплавов при SLS-методе выращивания образуются карбиды. Акустическая обработка обеспечивает их перемешивание и создает однородность распределения включений. Для материалов на основе железа при наплавке происходит кристаллизация в виде роста кристаллических проволок, и ультразвук позволяет разбить эти кристаллы. Акустическая обработка идет в разных направлениях, для передачи ультразвука используется волновод, частота акустического воздействия 22 кГц.





Доклад К. Базалевой (ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, Москва) "Структурные особенности композиционного материала с Inconel 625/TiC, синтезированного методом прямого лазерного выращивания (LMD-метод)" был особенно интересен специалистам-разработчикам лазерного технологического оборудования, не специализирующимся на проблемах материаловедения. Содержание доклада было посвящено тем превращениям, которые происходят в материале на уровне его микроструктуры. Порошок Inconel 625/TiC содержит частицы размером 50-140 мкм, в котором находятся частицы TiC размером 20-50 мкм. Образец для исследования выращивали при следующих условиях: диаметр луча 1 мм, скорость сканирования лучом 500 мм/мин, мощность пучка варьировалась в значениях 400, 600, 800 и 1000 Вт. В результате металлографических и рентгеноструктурных измерений оказалось, что в выращенном образце 20% материала составляют карбиды TiC, а 80% - интерметаллиды. Там, где появляется карбидная фаза, там растет трещина, но трещина останавливается в зоне образования карбидной фазы, если та имеет сферическую форму.

Из анализа специальных научных источников становится ясно, что за рубежом применяется предварительная подготовка порошка путем смешивания. Ее цель - получить из такого порошка готовую деталь с высокой твердостью на поверхности при одновременном получении высокой вязкости сердцевины детали.

Исследователи меняли структурное состояние порошка и предварительно перемешивали его. В результате перемешивания получается порошок другого состава, а выращенные из него образцы имели на поверхности высокую твердость за счет образования карбидного слоя (микротвердость на границе "покрытие-основа"

составило $300 \pm 7 \text{ HV}_{0,1}$). Тогда при расчете технологических установок аддитивного выращивания деталей для переплавления этого слоя надо организовать большее тепловложение. В структуре образца период NiC-матрицы уменьшается, а период армирующей TiC-матрицы не меняется. Увеличивая мощность лазера до 1000 Вт, удается повысить твердость и изменить степень перекристаллизации карбида частиц.

Азотирование стали 25X13H2и после прямого лазерного выращивания дало микротвердость $300 \pm 7 \text{ HV}_{0,1}$ при толщине упрочненного слоя 160 мкм. Надо учитывать, что у азотированных образцов часто встречается отслаивание упрочненного слоя. Кстати, специалистам-лазерщикам известно, что такой эффект часто наблюдается при ремонте валов с помощью лазерной наплавки железосодержащих материалов. После прямого лазерного выращивания детали из стали материал имеет структуру мартенсита с остаточным аустенитом и микротвердостью до $500 \text{ HV}_{0,1}$, пористость составила 2%.

Научную сессию завершил доклад технического директора компании "Делкам-М" А. Рагулина (Москва), представившего PowerMill Additive - программный продукт САМ-система. Программа разработана для гибридной системы создания деталей с помощью аддитивного выращивания и последующей фрезерной обработки. В программе предусмотрена как симуляция со снятием материала, так и симуляция с наращиванием материала. Программа базируется на масштабируемости задач (был показан пример работы системы при производстве винта). Последовательность программирования предусматривает построение геометрической модели детали с учетом потенциально получаемых деформаций, построение технологической модели генерации траектории, декорирование траектории, симуляцию кинематики инстру-





мента, симуляция выращивания. Декорирование траектории – термин, который определяет возможности внесения изменений в параметры исполнительного устройства (когда используется робот) с учетом торможения робота, несущего лазерную головку, в углах и на поворотах, изменения пределов по осям с учетом варьирования размеров рабочей камеры. Программа позволяет вносить поправки задержки времени, снижения мощности (это важно, когда на этапе отработки режимов аддитивного производства появляются новые результаты исследований процессов выращивания).

Далее идет симуляция техпроцесса. В программе предусмотрена стратегия создания 2,5D-деталей – выращивание детали с плоской базовой поверхностью и выращивание многоосевых 3D-элементов с произвольной базовой поверхностью. В PowerMill Additive заложена стратегия исключения перекрытия траекторий лазерного пучка при создании 3D-элементов методами аддитивного выращивания. Программа сочетается с промышленными компьютерами, работающими на отечественных производствах.

Главная особенность программного продукта PowerMill Additive состоит в том, что его можно

и нужно использовать как инструмент контроля выращивания детали!!! Ведь пока метрологическое обеспечение аддитивного производства отсутствует.

В дни работы IX Конференции "Лучевые технологии и лазерные приложения" состоялось знаменательное событие – подписание Соглашения о создании научно-производственного консорциума "Центр кораблестроения и морской техники". В церемонии подписания документа участвовали ректор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" Виктор Николаевич Шелудько, ректор Санкт-Петербургского государственного морского технического университета Глеб Андреевич Туричин, ректор Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) Андрей Павлович Шевчик, генеральный директор АО "Центр технологии судостроения и судоремонта" Михаил Владимирович Александров. Это партнерство направлено на развитие военного и гражданского судостроения в России на основе новых технологий производства и систем управления судами и подготовку современных инженерных кадров.

