

Разработка технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных изделий атомной энергетики

**В. А. Королев, А. В. Сидоров, И. Ю. Михайлов, А. А. Мацаев,
Е. В. Земляков, П. А. Кузнецов, Д. А. Намеев**

Рассмотрены основные преимущества прямого лазерного выращивания (ПЛВ) крупногабаритных изделий на примере выгородки внутрикорпусного устройства водо-водяного энергетического реактора (выгородка ВКУ ВВЭР). Рассмотрена проблема повреждения изделия во время эксплуатации в составе реактора. Изготовлены порошковые материалы нержавеющей стали марок 08X18H10T и 10X16H25MT для отработки процесса ПЛВ. Выполнена оптимизация конструкции выгородки с целью повышения эксплуатационной надежности. Методом ПЛВ изготовлены образцы и опытные малогабаритные фрагменты выгородки для проведения комплексных исследований и испытаний. Разработана концепция экспериментальной установки ПЛВ крупногабаритных изделий.

Ключевые слова: выгородка внутрикорпусного устройства водо-водяного энергетического реактора, прямое лазерное выращивание, порошковый материал, сталь марки 08X18H10T, сталь марки 10X16H25MT.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-5-46-55

Введение

В последнее десятилетие получили широкое развитие аддитивные технологии, позволяющие выращивать из металлических материалов детали сложной геометрической формы с минимальным применением механической обработки. Этот подход, основанный на доставке в заданные точки пространства малых порций материала и их соединения сплавлением или спеканием, обеспечивает геометрическую точность, которая зависит, как правило, лишь от размера доставляемых дискретных частиц [1 – 3]. Основными направлениями развития современных методов прямого выращивания деталей из металлического порошка являются повышение производительности процесса с максимальным коэффициентом использования материала и снижение времени на производство детали на всех этапах работ, от создания CAD (Computer-Aided Design) модели до получения непосредственного продукта. Преимущества и недостатки таких

методов широко описаны в литературе, например, [4]. Исходя из известных данных, наиболее перспективным является метод прямого выращивания деталей с использованием лазерного источника энергии, обладающий следующими преимуществами:

- полная автоматизация процесса с минимальным вмешательством рабочего персонала в технологический цикл производства деталей;
- минимизация затрат на последующую механическую обработку за счет высокой точности построения с возможностью обеспечения припусков от 0,5 мм;
- получение цельнометаллических деталей с равномерной структурой металла и уменьшенным размером зерна со скоростью построения свыше 100 см³/ч;
- высокая концентрация энергии в малом объеме материала на основе железа, никеля, титана;
- возможность проведения процессов изготовления, ремонтного восстановления и нанесения

функциональных защитных покрытий в различных пространственных положениях.

В процессе прямого лазерного выращивания (ПЛВ) изделие формируется из металлического порошка, подаваемого сжатой струей газа непосредственно в зону воздействия лазерного излучения [5 – 7]. Технология ПЛВ основывается на послойном формировании заготовки детали путем постепенного наращивания объема металла при плавлении сфокусированным лазерным излучением и последующей кристаллизации порошкового материала, подаваемого инертным газом в ванну расплава на поверхности построения заготовки. При этом прямой подвод лазерного излучения и порошка осуществляется по заранее запрограммированной траектории перемещения оптической системы с соплом над заготовкой согласно 3D-модели детали. В сравнении с прочими методами аддитивного производства ПЛВ позволяет изготавливать из порошковых материалов крупногабаритные изделия с заданными прочностными характеристиками при высокой производительности и отсутствии дефектов в виде крупных пор, трещин и посторонних включений. На данный момент технология ПЛВ обладает большим потенциалом для роста, ведутся разработки новых конструкций и отработка режимов, способных повысить точность, производительность и экономичность процесса выращивания. Данные факторы способны обеспечить качественный скачок в развитии концептуальных методов аддитивного производства и способствовать внедрению в новые области промышленности [8, 9].

Цель данной работы — разработка технологии изготовления крупногабаритных изделий атомной энергетики методом ПЛВ с проведением комплексных исследований для подтверждения целесообразности и эффективности разработанной технологии.

Обоснование применения перспективной технологии ПЛВ на примере изготовления выгородки ВКУ ВВЭР

Изготовление выгородки включает основные следующие операции:

1. Изготовление, проведение контроля и испытаний заготовки;
2. Предварительная механическая обработка;
3. Выполнение сверления/рассверливания отверстий;
4. Финишная механическая обработка;
5. Сборка и фрезеровка пазов;
6. Изготовление комплектующих и контрольная сборка.

Проведение сравнительной оценки изготовления выгородки по традиционной технологииковки и по аддитивной технологии позволило сделать вывод о снижении трудоемкости изготовления выгородки на 47 % при переходе на процесс ПЛВ. За основу для расчета времени изготовления одной заготовки кольца выгородки методом ПЛВ принимали одновременную работу шести технологических инструментов лазерной наплавки.

Данные сравнительной оценки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка сроков изготовления выгородки

Table 1

Comparative assessment of the manufacturing time of the core baffle

| № п/п | Наименование | Срок изготовления, мес. | |
|-------|---|------------------------------|---------------------------|
| | | Традиционная технологияковки | Аддитивная технология ПЛВ |
| 1 | Изготовление одной заготовки кольца выгородки | 2,0 | 1,5 |
| 2 | Проведение контролей и испытаний одной заготовки | 1,0 | 1,0 |
| 3 | Выполнение предварительной механической обработки одного кольца | 6,0 | Не требуется |
| 4 | Итого заготовка с идентичными припусками под окончательную механическую обработку | 9,0 | 2,5 |
| 5 | Выполнение сверления/рассверливания отверстий | 1,5 | 1,1 |
| 6 | Выполнение финишной механической обработки одного кольца | 3,0 | 3,0 |
| 7 | Сборка 4-х колец выгородки и фрезеровка пазов по кондуктору | 1,0 | 1,0 |
| 8 | Итого изготовление 4-х колец выгородки | 55,0 | 27,4 |
| 9 | Изготовление прочих комплектующих выгородки и контрольная сборка | 3,3 | 3,3 |
| 10 | Итого изготовление выгородки | 58,30 | 30,70 |

Полученные результаты сравнительной оценки сроков изготовления выгородки при переходе с традиционной технологии изготовления на аддитивную показывают перспективность и вероятные предпосылки для экономической эффективности изготовления выгородки методом ПЛВ.

Конструкция и условия эксплуатации выгородки ВКУ ВВЭР

Проведенные исследования влияния нейтронного облучения на свойства материала элементов ВКУ, изготовленных из аустенитных сталей [10, 11], показали, что современные тенденции по увеличению мощности и срока эксплуатации при разработке новых ВВЭР могут приводить к росту повреждаемости элементов ВКУ из-за возникающего в процессе облучения охрупчивания материала, приводящего в конечном итоге к разрушению. Самый облучаемый элемент ВКУ — выгородка.

Следует отметить, что выгородка монтируется в шахте при сборке реактора и находится в ней на протяжении всего срока службы без возможности ее извлечения для замены или ремонта. По прогнозным данным, к концу срока эксплуатации ВВЭР-1000 в материале выгородки возможно появление повреждений, которые способны ограничить ее работоспособность и, соответственно, работоспособность всего реактора.

В настоящее время основные элементы ВКУ реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, такие как выгородка внутрикорпусная, шахта внутрикорпусная и блок защитных труб, изготавливают из коррозионно-стойкой стали марки 08X18H10T [12, 13].

Конструкция выгородки ВВЭР-1200 представляет собой кольцевой цилиндр, состоящий из колец, скрепленных между собой шпильками и зафиксированных в плане друг относительно друга штифтами. Эскиз выгородки представлен на рис. 1.

В процессе эксплуатации реактора ВВЭР на элементы ВКУ действуют как силовые нагрузки (весовые и динамические, обусловленные потоком теплоносителя, возможными землетрясениями, нагружением при штатных аварийных ситуациях), так и напряжения, и деформации, обусловленные изменением температур во время переходных процессов, связанных с выходом на номинальный режим работы реактора, расхолаживанием, регулированием мощности. Кроме того, в процессе эксплуатации выгородка подвергается нейтронному облучению, вследствие чего происходит изотропное расширение её материала, так называемое распухание, которое ввиду неоднородности про-

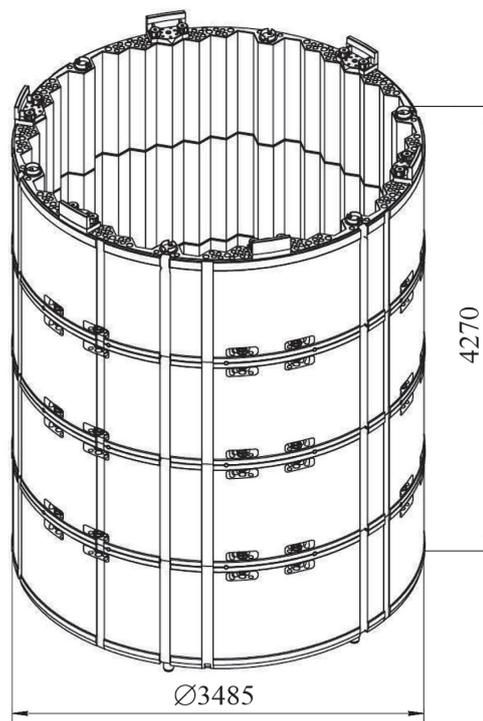


Рис. 1. Эскиз выгородки.

Fig. 1. Design of the core baffle.

текания этого процесса по объему конструкции наряду с радиационной ползучестью приводит к изменению геометрических размеров элемента и, как следствие, возникновению дополнительных внутренних напряжений, а также к охрупчиванию выгородки.

Увеличение степени радиационного упрочнения и снижение деформационного упрочнения приводит к сближению величин предела прочности и предела текучести, которые могут практически совпадать при высоких дозах. Одновременно происходит резкое уменьшение характеристик пластичности материала — относительного удлинения и сужения, что вызывает снижение трещиностойкости. Стоит отметить, что снижение пластичности в первую очередь связано с уменьшением деформационного упрочнения вследствие длительного воздействия на материал эксплуатационных температур в диапазоне 300 – 400 °С.

В связи с тем, что основным источником напряжений выгородки является градиент радиационного распухания, создающий значимые растягивающие напряжения на внутренней поверхности, контактирующей с теплоносителем, сочетание радиационного распухания материала выгородки с высокодозным облучением внутрен-

ней поверхности может приводить к межкристаллитному коррозионному растрескиванию.

Актуальную задачу повышения срока эксплуатации выгородки ВВЭР, работающей в самых жестких условиях, возможно решить за счет снижения рабочей температуры эксплуатации путем оптимизации конструкции кольца выгородки.

Оптимизация конструкции выгородки

С целью оптимизации конструкции было проработано несколько вариантов исполнения выгородки. Оптимизировали только расположение, количество и диаметр охлаждающих каналов выгородки. Остальные геометрические характеристики и конструкционные решения не изменяли относительно исходной конструкции.

Для повышения эффективности охлаждения выгородки количество каналов было увеличено вместе с уменьшением их диаметра, а также в зонах с максимальным энерговыделением, то есть ближе к внутренней поверхности выгородки, плотность каналов была повышена. Вместе с тем, уменьшение диаметра каналов приводит к росту гидравлического сопротивления, усложняет про-

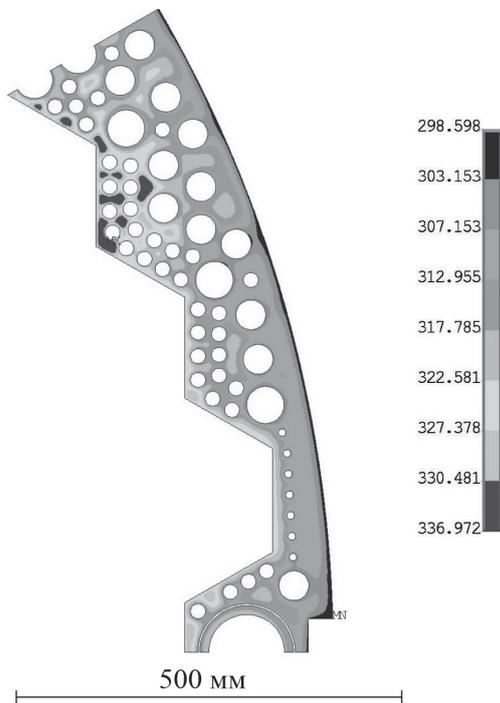


Рис. 2. Схема оптимизированной выгородки с распределением температур по сечению.

Fig. 2. Schematic diagram of the core baffle with cross-section temperature distribution.

филирование расходов в каналах и увеличивает подогрев теплоносителя. В связи с этим минимальный диаметр канала был принят равным 10 мм.

Модель сегмента выгородки была спроектирована при помощи специализированного программного обеспечения. Методика расчета температурных полей была основана на предварительном табулировании зависимостей коэффициентов теплоотдачи от пяти параметров: давление теплоносителя, температура теплоносителя, удельный расход теплоносителя, температура поверхности теплообмена и гидравлический диаметр. Расчетные формулы, используемые при определении коэффициентов теплоотдачи, выбирали согласно [14]. Задачу теплообмена решали с помощью программного комплекса "ANSYS".

В конечном итоге была предложена конструкция, приведенная на рис. 2. Оптимизированная выгородка представляет собой единое кольцо с выполненными в нём продольными охлаждающими каналами диаметрами 10, 20, 40, 50 и 130 мм. На рис. 2 изображена схема 30° сектора поперечного сечения оптимизированной выгородки с распределением температур по сечению.

В результате оптимизации конструкции выгородки удалось снизить максимальную температуру в металле на 35 °С, а перепад по наиболее температурно-напряженному сечению выгородки на 30 °С. Следует отметить, что оптимизация конструкции выгородки является итерационным процессом, зависимым от нескольких факторов: расположения и количества каналов, нейтронно-физических характеристик периферийных ТВС, расчета параметров радиационного воздействия, расчета теплогидравлических характеристик в каналах выгородки и расчета температурных полей.

Традиционными способами изготовления деталей невозможно изготовить данную оптимизированную конструкцию выгородки из-за уменьшения диаметров внутренних каналов до $\varnothing 10$ мм и $\varnothing 20$ мм. Для изготовления фрагментов исходной и оптимизированной конструкции выгородки была отработана технология ПЛВ образцов из порошковых материалов стали марок 08X18H10T и 10X16H25MT.

Отработка технологии ПЛВ

В качестве материала для технологии ПЛВ применяли порошки нержавеющей стали марок 08X18H10T и 10X16H25MT российского производства. Порошковый материал стали марки 10X16H25MT был впервые изготовлен в РФ на

Химический состав исследуемых порошковых материалов

Table 2

Chemical composition of the investigated powder materials

| Сталь | Содержанием, масс. % | | | | | | | | |
|------------|----------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | Fe | Cr | Ni | Mo | Ti | Mn | Cu | Si | Al |
| 08X18H10T | осн | 16,93 | 14,43 | — | 0,05 | 1,28 | 0,08 | — | — |
| 10X16H25MT | осн | 15,3 | 24,8 | 1,05 | 0,56 | 1,65 | 0,07 | 0,56 | 0,05 |

установке HERMIGA 75/3IV из отливок стали марки 10X16H25MT ТУ 24.10.22-201-07516250-2018.

Были проведены исследования порошковых материалов с целью определения химического состава методом определения элементного состава с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 5136-LM с рентгенофлуоресцентной приставкой Inka, фракционного состава методом лазерной дифракции на анализаторе частиц Mastersizer 2000, сферичности неразрушающим контролем морфологии частиц с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 5136-LM и текучести по ГОСТ 20899-98 с помощью воронки Холла с диаметром отверстия $2,5 \pm 0,2$ мм, аналитических весов ANDGH-252. По результатам исследования физических и технологических свойств материалов было получено следующее:

химический состав порошка стали марки 08X18H10T соответствует ГОСТ 5632-2014, химический состав порошка стали марки 10X16H25MT

соответствует ТУ 24.10.22-201-07516250-2018 (табл. 2);

фракция порошка стали марки 08X18H10T составляет 60 – 120 мкм, порошка 10X16H25MT — 40 – 160 мкм;

текучесть (время истечения 50 г порошка через стандартную воронку Холла) порошка стали марки 08X18H10T составляет 21,89 с, порошка 10X16H25MT — 19,75 с;

частицы порошков обладают преимущественно сферической формой (> 70 %), также в порошке присутствуют частицы неправильной формы и сателлиты. СЭМ изображения порошков приведены на рис. 3.

Для отработки технологических режимов ПЛВ, опытного изготовления образцов для испытаний и фрагментов выгордки была применена установка ПЛВ ИЛИСТ М с одним роботом. Основные характеристики установки ПЛВ, применяемой для синтеза заготовок образцов и фрагментов выгордки: размер рабочей зоны технологической установки

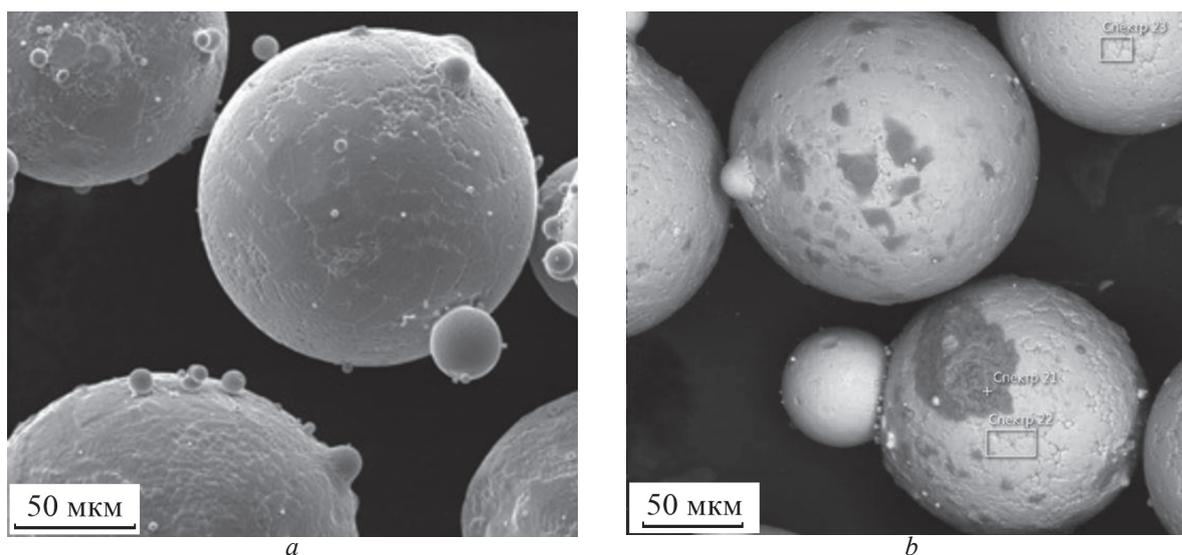


Рис. 3. СЭМ изображения частиц порошков: *a* — 08Cr18Ni10Ti, *b* — 10Cr16Ni25MoTi.

Fig. 3. SEM images of powder particles: *a* — 08Cr18Ni10Ti, *b* — 10Cr16Ni25MoTi.

Таблица 3
Результаты испытаний на ударный изгиб
по ГОСТ 9454-78

Table 3
Results of impact bending tests according to GOST 9454-78

| Образцы сплавов | Работа удара, Дж | Ударная вязкость, Дж/см ² |
|-----------------|------------------|--------------------------------------|
| 08X18H10T | 210,6 | 265 |
| | 185,8 | 232 |
| | 229,8 | 287 |
| | 229,8 | 288 |
| | 219,5 | 275 |
| | 205,6 | 258 |
| 10X16H25MT | 146,6 | 182 |
| | 132,7 | 164 |
| | 126,3 | 157 |
| | 122,8 | 155 |
| | 127,4 | 158 |
| | 140,5 | 176 |

— 900 × 600 мм; мощность лазера — 5 кВт; количество координат манипулятора 6 + 2; контролируемая рабочая атмосфера — Ar (99,998 %); толщина одного наплавляемого слоя — от 200 мкм; производительность — до 1,2 кг/ч.

После отработки технологии ПЛВ были изготовлены образцы (по 3 образца, ориентированных вертикально и горизонтально относительно направления роста пластины) и проведен рентге-

носпектральный микроанализ на растровом электронном микроскопе Tescan Vega II и испытания на определение механических свойств на электро-механической разрывной машине Instron 3367 и на маятниковом копере Metrocom 06103300, которые показали следующее:

для образцов из стали марок 08X18H10T и 10X16H25MT характерна однородная структура с немногочисленными порами округлой формы диаметром от 5 до 300 мкм. В образцах из стали 10X16H25MT обнаружены шаровидные оксидные включения размером до 20 мкм на основе титана, содержащие до 5 масс. % алюминия, а также включения карбонитридов титана размерами менее 0,5 мкм;

в табл. 3 представлены данные результатов испытаний на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78;

в табл. 4 представлены данные результатов испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84.

Как видно из представленных результатов, ударная вязкость изменяется незначительно, сохраняется анизотропия ударной вязкости между горизонтальными и вертикальными образцами. Анизотропия механических свойств также сохраняется во всех случаях. Синтезированные с помощью ПЛВ материалы превосходят по характеристикам предела прочности, предела текучести аналогичные материалы, полученные традиционными методами.

Для подтверждения возможности изготовления выгородки из порошковых материалов сталей марок 08X18H10T и 10X16H25MT на установке

Таблица 4
Результаты испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84

Table 4
Results of tensile tests according to GOST 1497-84

| Образцы | Временное сопротивление, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % | Относительное сужение, % |
|------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| 08X18H10T | 622 | 292 | 59 | 77 |
| | 619 | 291 | 58 | 75 |
| | 621 | 288 | 61 | 75 |
| | 633 | 297 | 56 | 74 |
| | 629 | 292 | 58 | 75 |
| | 630 | 291 | 57 | 73 |
| 10X16H25MT | 530 | 330 | 27 | 50 |
| | 540 | 340 | 36 | 67 |
| | 550 | 350 | 33 | 63 |
| | 530 | 340 | 46 | 70 |
| | 520 | 340 | 44 | 49 |
| | 460 | 300 | 51 | 58 |

ПЛВ были изготовлены фрагменты исходной и оптимизированной конструкции выгородки.

Проведенные измерения изготовленных фрагментов выгородки и сопоставления их с заданной 3D-моделью показали, что отклонения по основным габаритным размерам не превышают ± 2 мм, отклонения по диаметрам отверстий не превышают 0,5 мм. Данные значения будут учтены при разработке технологической модели выгородки с целью задания необходимых припусков для проведения финишной механической обработки изделия после процесса ПЛВ.

В ходе дальнейших работ было принято решение об изготовлении выгородки из порошка 08X18H10T. Причем необходима последующая оптимизация технологических параметров ПЛВ для порошка 08X18H10T с целью снижения количества и размера газовых пор в синтезированном металле изделия.

Концепция установки ПЛВ крупногабаритных изделий атомной энергетики

Для обоснования целесообразности технологии ПЛВ крупногабаритных изделий атомной энергетики с учетом полученных выше результатов планируется разработка установки ПЛВ с двумя наплавочными технологическими инструментами. На данном оборудовании будет изготовлен полномасштабный фрагмент выгородки высотой 1000 мм.

Концепция установки ПЛВ заключается в следующем:

— прямое лазерное выращивание заготовки изделия при совместной и синхронизированной работе двух наплавочных систем с позиционером. Данный процесс реализуется благодаря специальному алгоритму траекторных перемещений инструментов над подложкой, закрепленной на позиционере и вращающейся относительно своей оси;

— функционально два робота и позиционер объединены в одну роботизированную ячейку, управляемую одним контроллером робота, при этом два робота являются первой и второй группой движения, позиционер — третьей. Реализовано скоординированное движение роботов относительно позиционера. Это перемещение может быть запрограммировано, как в рамках одной управляющей программы, так и в двух выполняемых параллельно. При этом программирование роботов осуществляется в динамической пользовательской системе координат, привязанной к столу позиционера;

— перемещения роботов автоматически адаптируются при вращении стола таким образом, чтобы поддерживать относительное движение технологических инструментов относительно вращаемого изделия. Тем самым, для бесперебойного и эффективного процесса изготовления выгородки необходимо синхронно управлять сразу 13 осями установки, обеспечивая слежение за сингулярностью роботов, а также предотвращая коллизии всех частей установки и изделия. Алгоритм данного процесса ПЛВ содержит обширный комплекс чередования специальных траекторных перемещений инструментов над заготовкой совместно с подобранными технологическими параметрами ПЛВ.

Выводы

Проведена сравнительная оценка изготовления выгородки по традиционной и аддитивной технологии изготовления, что позволило утверждать о снижении трудоемкости изготовления выгородки на 47 % при переходе на процесс ПЛВ.

Оптимизация конструкции выгородки позволила снизить максимальную температуру в металле на 35 °С, а перепад по наиболее температурно-напряженному сечению выгородки — на 30 °С.

На примере изготовления образцов и фрагментов конструкций выгородок из сталей марок 08X18H10T и 10X16H25MT отработана технология ПЛВ. Получены удовлетворительные механические свойства образцов.

Планируется выращивание фрагмента оптимизированной конструкции выгородки высотой 1000 мм из порошка стали 08X18H10T, а также изготовление крупногабаритных и массивных изделий методом ПЛВ, по индивидуально разработанному алгоритму траекторных перемещений на основе моделирования процесса в САМ программе по проектируемой 3D модели.

Подтверждена актуальность работ по разработке установки ПЛВ крупногабаритных изделий атомной энергетики, в том числе для изготовления полномасштабного кольца выгородки высотой 1000 мм после оптимизации технологических параметров ПЛВ.

Литература/References

1. Shishkovsky I., Missemer F., Smurov I. Metal matrix composites with ternary intermetallic inclusions fabricated by laser direct energy deposition. *Composite Structures*, 2018, no. 183, pp. 663 – 670.

2. Barakhtin B.K., Bobyry V.V., Voznyuk A.V., Deev A.A., Zhukov A.S., Kuznetsov P.A. Optimization of technological parameters and determination of selective laser melting modes of 316L-based composition powder. *Problems of Materials Science*, 2017, no. 90, pp. 146 – 152.
3. Gibson Ya., Rosen D., Staker B. Additive manufacturing technologies. Three-dimensional printing, rapid prototyping and direct digital production. *Technosphere*, 2016, 656 p.
4. Pallari J.H. P., Dalgarno K.W., Woodburn J. Mass customization of foot orthoses for rheumatoid arthritis using selective laser sintering. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, no. 7, pp. 1750 – 1756.
5. Turichin G.A., Klimova O.G., Zemlyakov E.V., Babkin K.D., Kolodyazhnyy D.Yu., Shamray F.A., Travyanov A.Ya, Petrovskiy P.V. Technological aspects of high speed direct laser deposition based on heterophase powder metallurgy. *Physics Procedia*, 2015, no. 78, pp. 397 – 406.
6. Turichin G.A., Somonov V.V., Babkin K.D., Zemlyakov E.V., Klimova O.G. High-speed direct laser deposition: technology, equipment and materials. *IOP Conference series: Materials science and engineering*, 2016, no. 125, art. 012009.
7. Dass A., Morid A. State of the art in directed energy deposition: from additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 2019, no. 9(7), art. 418, doi.org/10.3390/coatings9070418.
8. Туричин Г.А., Климова-Корсмик О.Г., Земляков Е.В., Бабкин К.Д., Шамрай Ф.А., Петровский П.В., Травянов А.Я., Колодяжный Д.Ю. Аддитивная технология гетерофазной порошковой лазерной металлургии. *Технологи лёгких сплавов*, 2016, № 1, с. 53 – 56.
1. Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Zemlyakov E.V., Babkin K.D., Shamraj F.A., Petrovskiy P.V., Travyanov A.Y., Kolodyazhnyy D.Y. Additivnaya tekhnologiya geterofaznoj poroshkovoj lazernoj metallurgii [Additive technology of heterophase powder laser metallurgy]. *Tekhnologii lyogkih splavov* [Light Alloy Technologists], 2016, no. 1, pp. 53 – 56, (in Russ.).
9. Зленко М.А., Попович А.А., Мутьлина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013, 222 с.
 - Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive technologies in mechanical engineering], St-Pb, Politekh. Univer. Publ., 2013, 222 p. (in Russ.).
10. Куревич И.П., Марголин Б.З., Прокошев О.Ю., Кохонов В.И. Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении: влияние различных факторов. *Вопросы материаловедения*, 2006, № 4 (48), с. 55 – 68.
 - Kursevich I.P., Margolin B.Z., Prokoshev O.Y., Kohonov V.I. Mekhanicheskie svojstva austenitnyh stalej pri nejtronnom obluchenii: vliyanie razlichnyh faktorov [Mechanical properties of austenitic steels under neutron irradiation: Influence of various factors]. *Voprosy materialovedeniya* [Materials science issues], 2006, no. 4 (48), pp. 55 – 68, (in Russ).
11. Сорокин А.А., Марголин Б.З., Куревич И.П., Минкин А.И., Неустроев В.С., Белозеров С.В. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР. *Вопросы материаловедения*, 2011, №2 (66), с. 131 – 152.
 - Sorokin A.A., Margolin B.Z., Kursevich I.P., Minkin A.I., Neustroev V.S., Belozeroev S.V. Vliyanie nejtronного oblucheniya na mekhanicheskie svojstva materialov vnutrikorpusnyh ustrojstv reaktorov tipa VVER [Effect of neutron irradiation on mechanical properties of VVER core baffle]. *Voprosy materialovedeniya* [Materials science issues], 2011, no. 2 (66), pp. 131 – 152, (in Russ).
12. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002, 480 с.
 - Denisov V.P., Dragunov Y.G. Reaktornye ustanovki VVER dlya atomnyh elektrostancij [VVER reactor units for nuclear power plants]. Moscow, Izdat, 2002, 480 p., (in Russ).
13. Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М.: Логос, 2010, 604 с.
 - Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasil'ev B.Y., Generalov V.N., Kosourov K.B., Semchenkov Y.M., Ukraincev V.F. AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evolyucii proekta [NPP with VVER-1000 type reactor. From the physical basis of operation to the evolution of the project]. Moscow, Logos Publ., 2010, 604 p., (in Russ).
14. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977, 344 с.
 - Miheev M.A., Miheeva I.M. Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer], Moscow, Energiya Publ., 1977, 344 p. (in Russ).

*Статья поступила в редакцию — 25.07.2022 г.
после доработки — 21.09.2022 г.
принята к публикации — 22.09.2022 г.*

Королев Владимир Александрович — Общество с ограниченной ответственностью “Русатом – Аддитивные технологии” (115409, Москва, Каширское шоссе, 49), директор по разработке продуктов, заместитель генерального директора, специалист в области материаловедения и технологии материалов. E-mail: VlaAlKorolev@rosatom.ru.

Сидоров Александр Вячеславович — Общество с ограниченной ответственностью “Русатом – Аддитивные технологии” (115409, Москва, Каширское шоссе, 49), руководитель проектов по технологическому направлению DMD, специалист в области материаловедения и технологии новых материалов. E-mail: AlVyaSidorov@rosatom.ru.

Михайлов Иван Юрьевич — Общество с ограниченной ответственностью “Русатом – Аддитивные технологии” (115409, Москва, Каширское шоссе, 49), начальник научно-технического отдела, специалист в области материаловедения и технологии материалов. E-mail: YyuMikhaylov@rosatom.ru.

Мацаев Антон Александрович — Общество с ограниченной ответственностью “Русатом – Аддитивные технологии” (115409, Москва, Каширское шоссе, 49), главный эксперт технологического отдела, специалист в области лазерных технологий в машиностроении. E-mail: AAMatsaev@rosatom.ru.

Земляков Евгений Вячеславович — Институт лазерных и сварочных технологий (198096, Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38А), кандидат технических наук, заместитель директора по науке и проектной деятельности, специалист в области лазерных и аддитивных технологий. E-mail: e.zemlyakov@ilwt.smtu.ru.

Кузнецов Павел Алексеевич — Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов “Прометей” имени И.В. Горьнина национального исследовательского центра “Курчатовский институт” (191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49), доктор технических наук, начальник НИО-35, специалист в области материаловедения и технологии материалов. E-mail: prometey_35otdel@mail.ru.

Намеев Денис Альбертович — Акционерное общество “ТВЭЛ” (115409, Москва, Каширское шоссе, 49), руководитель направления, специалист в области материаловедения и технологии новых материалов. E-mail: DAINameev@rosatom.ru.

Development of direct laser deposition technology for large-scale products of nuclear power engineering

**V. A. Korolev, A. V. Sidorov, I. Y. Mikhailov, A. A. Matsaev, E. V. Zemlyakov,
P. A. Kuznetsov, D. A. Nameev**

The main advantages of direct laser deposition (DLD) of large-sized products are discussed on the example of the internal core baffle of a pressurized water reactor (VVER core baffle). The problem of product damage during operation as a part of reactor was considered. Powder materials of stainless steel with Russian grades 08Cr18Ni10Ti and 10Cr16Ni25MoTi were produced to develop the DLD process. Optimization of the core baffle design was carried out to improve operating reliability. Samples and fragments of the core baffle were manufactured by DLD method with complex research and tests. The concept of an experimental DLD unit for large-scale parts were developed.

Key words: internal core baffle of pressurized water reactor, direct laser deposition, powder material, 08Cr18Ni10Ti steel, 10Cr16Ni25MoTi steel.

Korolev Vladimir — Rusatom – Additive Technologies, Limited Liability Company (115409, Moscow, Kashirskoye highway, 49), director of product development, deputy general director, specialist in the field of materials science and technology of materials. E-mail: VlaAlKorolev@rosatom.ru.

Sidorov Alexander — Rusatom – Additive Technologies, Limited Liability Company (115409, Moscow, Kashirskoye highway, 49), project manager for DMD technological direction, specialist in the field of technological machines and equipment. E-mail: AlVyaSidorov@rosatom.ru.

Mikhailov Ivan — Rusatom – Additive Technologies, Limited Liability Company (115409, Moscow, Kashirskoye highway, 49), head of scientific and technical department, specialist in the field of materials science and materials technology. E-mail: IYuMikhaylov@rosatom.ru.

Matsaev Anton — Rusatom – Additive Technologies, Limited Liability Company (115409, Moscow, Kashirskoye highway, 49), chief expert of technological department, specialist in the field of laser technologies in mechanical engineering. E-mail: AAMatsaev@rosatom.ru.

Zemlyakov Evgenii — Institute of laser and welding technologies (198096, St-Petersburg 38A Marshala Zhukova Ave.), deputy director for science and project activities, candidate of technical sciences, specialist in the field of laser and additive technologies. E-mail: e.zemlyakov@ilwt.smtu.ru.

Kuznetsov Pavel — NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey” (191015, St. Petersburg, Shpalernaya str., 49.), Dr Sci (Eng), head of NIO-35, expert in materials science and materials technology. E-mail: prometey_35otdel@mail.ru.

Nameev Denis — Joint Stock Company “TVEL” (115409, Moscow Kashirskoye highway, 49), head of the department, specialist in the field of additive technologies. E-mail: DAINameev@rosatom.ru.