

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ

А. Ф. Ильющенко¹, А. И. Лецко¹, Е. И. Кордикова²,
Т. А. Николайчук¹, О. О. Кузнечик¹

¹Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь

В работе приведены полученные на основе анализа конструкций, применяющих СЛС 3D-принтеров, обобщенные функциональные схемы, которые могут быть использованы для проектирования перспективных технологических камер со встроенными блочно-модульными секционными нагревателями. Особенностью таких нагревателей является возможность подъема и опускания внутри их рабочих зон платформ для 3D-печати, что позволяет совместить процессы СЛС и термообработки в едином технологическом цикле. В работе отмечается, что такое проектирование технологических камер будет способствовать, с одной стороны, снижению вероятности возникновения в материалах изделий горячих и холодных трещин при 3D-печати СЛС. С другой – способствовать возможности использования в качестве расходного сырья не только металлических порошков, сплавы которых рекомендованы к сварке, но и также металлических сплавов, наиболее чувствительных к возникновению горячих и холодных трещин, включая металлические порошки, содержащие интерметаллиды или МАХ-фазу, а также керамику.

Введение. Последовательное селективное лазерное сплавление (СЛС) порошковых слоев, осуществляемое методом трехмерной цифровой (3D) печати с использованием 3D-принтеров, в настоящее время занимает устойчивое положение в бурно развивающихся, зародившихся со второй половины 80-х годов прошлого столетия аддитивных технологиях аддитивного производства [1, 2]. Из анализа работ [1–3] следует, что основанное на аддитивных технологиях аддитивное производство относят к одному из локомотивов развития шестого (последнего) технологического уклада и четвертой технической революции. Согласно работам [4–7], в аддитивном производстве все выполняемые в течение

одного цикла технологические операции можно условно разделить на три группы: подготовительные, базовые и заключительные. В аддитивных технологиях, использующих СЛС, к числу первых, например, относятся программное построение виртуальных 3D-моделей изделий вместе с крепящими их к платформе 3D-печати поддержками, а также виртуальное преобразование этих 3D-моделей в STL-модели, в которых изделия вместе с поддержками их к платформе 3D-печати представлены в виде набора последовательно следующих друг за другом сечений толщиной со сформованный и сплавленный порошковый слой. К базовым – последовательное послойное формование и СЛС этих порошковых слоев на платформе 3D-печати, а к завершающим – операции термической и механической обработки. При этом термическая обработка направлена на упрочнение материала получаемых изделий, а механическая – на отделение изделий от платформы построения и финишную доводку их поверхностей до требуемых размеров. Как правило, подготовительные и завершающие операции 3D-печати осуществляются без использования 3D-принтеров.

Развитие основанных на СЛС аддитивных технологий является актуальной задачей для аддитивного производства. Этому развитию может способствовать проектирование технологической камеры 3D-принтера, в которой возможно совмещение технологических операций СЛС и термообработки получаемых во время 3D-печати изделий. Решение этой задачи является целью данной работы.

Анализ конструкций 3D-принтеров для 3D-печати СЛС, роль технологических камер и возможности использования в них металлических порошков. Как показал анализ работ [6–8], в настоящее время конструктивные возможности большинства выпускаемых 3D-принтеров для 3D-печати СЛС позволяют им реализовать определенный цикл технологических операций, который можно представить в виде некоторой обобщенной схемы, приведенной на рис. 1. Эти операции так же, как и операции, выполняемые при 3D-печати СЛС, о которых шла речь во введении, можно условно разделить на подготовительные, основные и заключительные.

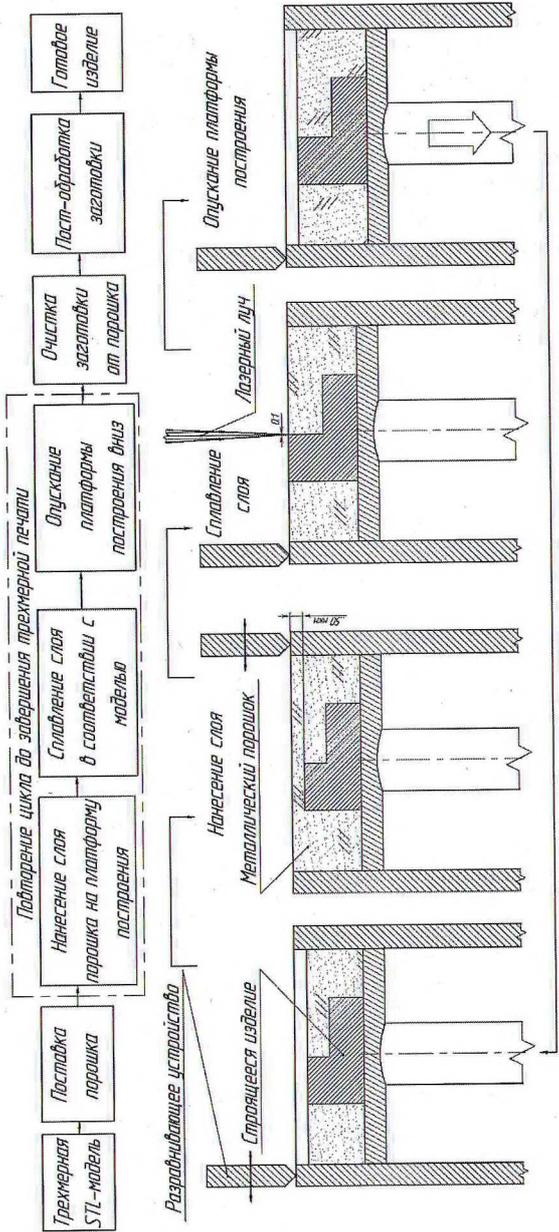


Рис. 1. Обобщенная технологическая схема реализуемого в технологической камере 3D-принтера процесса СЛС

К подготовительным операциям, приведенным на рис. 1, следует относить загрузку в виртуальную память компьютера 3D-принтера трехмерной STL-модели изделий (или одного изделия) вместе с поддержками к платформе 3D-печати, а также поставку порошка в бункер с платформой его подачи.

К основным операциям, которые на рис. 1 обозначены рамкой цикличности, следует относить формование на платформе построения (3D-печати) порошкового слоя, а также его избирательное сплавление лазерным лучом с последующим пошаговым опусканием этой платформы вниз на глубину сформованного и сплавленного порошкового слоя.

Согласно приведенной на рис. 1 обобщенной схеме, к завершающим операциям следует относить подъем платформы 3D-печати заготовки, ее очистку от неиспользованного порошка и извлечение из 3D-принтера постобработки. При этом под заготовкой следует понимать группу изделий (или одно изделие) вместе с поддержками, крепящими их к платформе 3D-печати, а под постобработкой – последовательно выполняемые операции термической и механической обработки, о которых уже сообщалось во введении.

Если провести анализ конструкций [6–8] существующих 3D-принтеров для 3D-печати СЛС, то в них можно выделить технологические камеры, в которых, за исключением загрузки STL-модели, выполняются все приведенные на рис. 1 операции. Выполнение этих операций возможно благодаря входящим в ее конструкцию функциональным элементам, имеющим между собой определенную взаимосвязь, схематично показанную на рис. 2.

Технологические камеры 3D-принтеров для 3D-печати СЛС, которые в конструктивном отношении соответствуют обобщенной функциональной схеме, приведенной на рис. 2, в настоящее время позволяют после постобработки получать изделия из термопластичных полимерных или металлических порошков. Известно [6–8], что СЛС металлических порошков, с одной стороны, относится к разновидности быстротекущих высокотемпературных процессов, для которых характерно возникновение внутри получаемых при остывании слоев порошкового

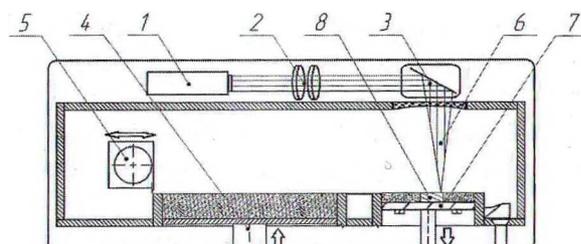


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема технологической камеры: 1 – лазер; 2 – объектив; 3 – система «отклоняющие зеркала-F-Theta объектив»; 4 – платформа подачи материала; 5 – разравнивающее устройство; 6 – сфокусированный поток лазерного излучения; 7 – платформа построения изделий; 8 – строящееся изделие

материала или покрытия термических напряжений, имеющих высокую амплитуду и импульсно изменяющихся во времени. С другой стороны, по своей природе СЛС также относится к родственным процессам сварки и наплавки металлов и сплавов. Поэтому в качестве расходного сырья для 3D-печати таким методом будут являться металлические порошки только тех сплавов, которые рекомендованы для сварки. Причиной данного ограничения являются возможные вероятные процессы образования горячих и холодных трещин в сплавленных порошковых слоях при остывании, вызванных характерной для сварки дефектной структурой и возникающими внутри образующегося при СЛС порошкового материала характерными термическими напряжениями. Снизить такие напряжения можно с помощью совмещения технологических операций СЛС и термообработки получаемых во время 3D-печати порошковых слоев. В основе этой термообработки может лежать последовательный секционный нагрев с возможностью регулирования температуры в каждой отдельной секции.

Совмещение операций СЛС и термообработки на стадии проектирования технологической камеры. При проектировании перспективных образцов технологической камеры рекомендуется учитывать блочно-модульный подход [6–8], который позволяет использовать в качестве унифицированной основы уже

освоенные производством модели 3D-принтеров, предназначенных для 3D-печати СЛС. В перспективе это позволит сократить издержки на производство, ремонт и обслуживание новых моделей этих изделий, включая подготовку производственного и обслуживающего персонала. В частности, такое проектирование может начинаться с дополнения в обобщенную функциональную схему технологической камеры (рис. 2) нагревательного устройства, внутрь которого внесена платформа для 3D-печати СЛС. Конструктивной особенностью этого устройства должны стать содержащиеся в нем вертикально расположенные секции, имеющие тепловые электронагреватели (ТЭН). Внутреннее пространство этих секций должно обеспечивать возможность платформе для 3D-печати СЛС последовательно проходить через содержащие ТЭН секции при своем опускании или подъеме. Учитывая выше рекомендованный подход к проектированию, в конструктивном отношении такое устройство по своей сути должно представлять блочно-модульный секционный нагреватель, обобщенная функциональная схема которого представлена на рис. 3.

В конструкции блочно-модульного секционного нагревателя в качестве материала теплоизолятора и каркаса для крепления ТЭН может использоваться шамот, плиты которого следует соединять между собой с помощью зигзагообразной стыковки (рис. 4). При сборке такой конструкции плиты следует плотно подгонять друг к другу.

Для обеспечения зазоров и сглаживания температурных полей на границах секционных переходов между платформой для 3D-печати и внутренними стенками шахты блочно-модульного секционного нагревателя следует устанавливать сменные тонкостенные вкладыши. Для изготовления таких вкладышей может использоваться тот же материал, что и для изготовления платформы для 3D-печати. Для задания и регулировки температуры в отдельно взятой зоне нагрева блочно-модульного секционного нагревателя следует использовать источники тока с параметрической стабилизацией, представляющих собой систему, функциональная схема которой приведена на рис. 5.

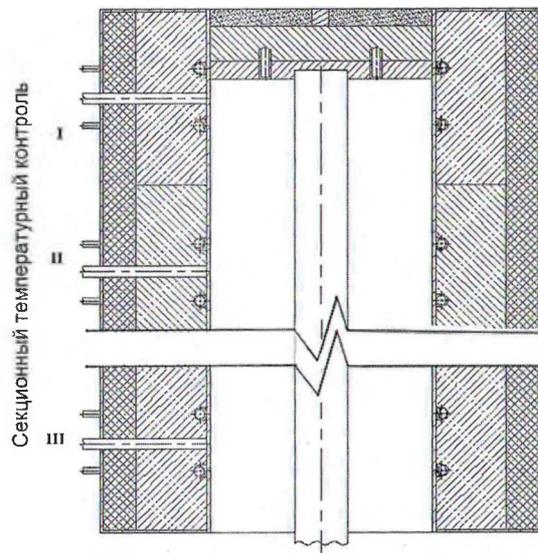


Рис. 3. Обобщенная схема блочно-модульного секционного нагревателя: (I – n) – порядковый номер нагревательной секции

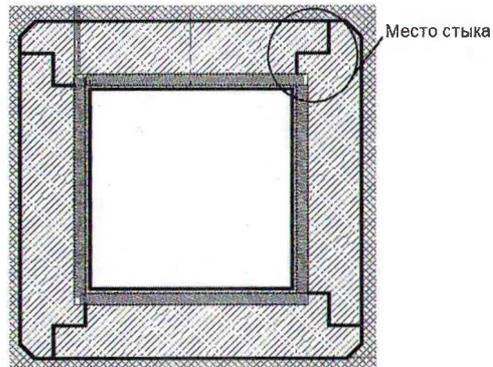


Рис. 4. Модельное сечение стыковки пластин (плит) блочно-модульного секционного нагревателя

В основе приведенной на рис. 5 функциональной схемы лежит адаптивное управление системой отдельных источников тока, питающих ТЭН отдельной секции. Это управление

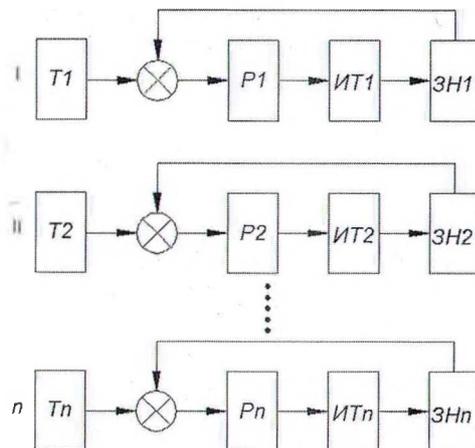


Рис. 5. Функциональная схема автоматической регулировки температуры и параметрической стабилизации источников тока блочно-модульного секционного нагревателя: T – температурный контроллер; $ИТ$ – источник тока; $ЗН$ – зона нагрева; P – ПИД-регулятор

осуществляется на основе обратной связи между параметрами электрического нагрева отдельной зоны и текущей в ней температуры с учетом трех слагаемых, первое из которых относится к пропорциональному усилению сигнала рассогласования. Это рассогласование определяется разностью величин токов входного сигнала в ПИД-регулятор, соответствующего программно заданной температуре и сигналу обратной связи, получаемого от секционного датчика температуры. Вторым таким слагаемым является получаемая в течение определенного промежутка времени интегральная составляющая сигнала рассогласования, а третьим – его временная производная. Следует отметить, что входные сигналы, соответствующие программно заданной температуре для отдельно взятой секции, являются эталонными. Использование трех слагаемых при автоматической регулировке температуры и параметрической стабилизации питающих ТЭН источников тока обеспечивает наилучшую помехозащищенность в работе системы, функциональная схема которой приведена на рис. 5.

При проектировании технологических камер с встраиваемым блочно-модульным секционным нагревателем, имеющим в каждой зоне автоматическую регулировку температуры и параметрической стабилизации источников тока, количество входящих в такой нагреватель секций ограничивается габаритными размерами 3D-принтера для 3D-печати СЛС и габаритными размерами используемых функциональных элементов, приведенных на рис. 3–5. Проектирование технологических камер со встраиваемым блочно-модульным секционным нагревателем позволяет на практике совмещать технологические операции послойного СЛС и термообработки получаемых во время 3D-печати изделий. Как следует из анализа работ [5–8], благодаря этому возможно снижение не только уровня возникновения в материалах получаемых изделий характерных дефектов, но и снижение в процессе СЛС вероятности появления горячих и холодных трещин. Поэтому использование в составе технологической камеры 3D-принтера блочно-модульного секционного нагревателя, внутри которого может перемещаться платформа 3D-печати СЛС, позволит применять в качестве расходного сырья металлические порошки не только сплавов, рекомендованных к сварке, но и также металлических сплавов, наиболее чувствительных к возникновению горячих и холодных трещин, включая металлические порошки, содержащие интерметаллиды или МАХ-фазу, а также керамику.

Выводы

1. На основе анализа конструкций, использующих СЛС 3D-принтеров, получены обобщенные функциональные схемы, которые могут быть использованы для проектирования перспективных технологических камер со встроенными блочно-модульными секционными нагревателями. Особенностью таких нагревателей является возможность подъема и опускания внутри их рабочих зон платформ для 3D-печати, что позволяет совместить процессы СЛС и термообработки в едином технологическом цикле.

2. Проектирование технологических камер с блочно-модульными секционными нагревателями будет способствовать, с одной стороны, снижению вероятности возникновения в получаемых при 3D-печати СЛС изделиях горячих и холодных трещин. С другой стороны, это даст возможность использовать в качестве расходного сырья не только металлические порошки, сплавы которых рекомендованы к сварке, но и также металлические порошки из сплавов, наиболее чувствительных к возникновению горячих и холодных трещин, включая металлические порошки, содержащие интерметаллиды или МАХ-фазу, а также керамику.

Список использованных источников

1. История порошковой металлургии за 50 лет / под ред. О. В. Романа, Р. А. Витязя, А. Ф. Ильющенко. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 672 с.
2. История и классификация аддитивных технологий. Оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://extxe.com/3698/istorija-i-klussifikacija-additivnyh-tehnologij>. – Дата доступа: 14.07.2021.
3. Ильющенко, А. Ф. Эффективный инструмент современного машиностроения / А. Ф. Ильющенко // Наука и инновации. – 2016. – № 2 (156). – С. 16–20.
4. Довбыш, В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зеленко. – М.: Препринт, НАМИ, 2014. – 57 с.
5. Юрасев, Н. И. О возможности развития аддитивных технологий в России / Н. И. Юрасев // Современная экономика: проблемы и решения. – 2015. – № 9 (65) – С. 72–79.
6. 3D-технологии. Научный форум [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018010212>. – Дата доступа: 15.07.2021.
7. Аддитивные технологии и порошковая металлургия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://extxe.com/9838/additivnye-tehnologii-i-poroshkovaja-metallurgija>. – Дата доступа: 15.07.2021.
8. 3D-печать металлами. Технологии и оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://integral-russia.ru/2017/09/09/3d-pechat-metallami-tehnologii-i-oborudovanie>. – Дата доступа: 15.07.2021.