

ПРЯМОЕ И НЕПРЯМОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Н. К. Толочко, Н. Н. Романюк, П. В. Авраменко,
В. Б. Кравцов**

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

Обсуждаются особенности аддитивных технологий, применяемых для прямого и непрямого изготовления металлических деталей машин. Рассмотрен опыт разработки некоторых из этих технологий в БГАТУ.

Аддитивные технологии (АМ-технологии – от англ. Additive Manufacturing) получили наиболее широкое распространение в машиностроении. Их применяют при создании различных деталей машин. Поскольку большинство деталей являются металлическими, то особый практический интерес представляют такие АМ-технологии, которые позволяют создавать детали из металлов. Изготовление металлических деталей с помощью АМ-технологий может быть прямым и непрямым. В первом случае готовые детали получают непосредственно с помощью АМ-технологий, во втором – сначала с помощью АМ-технологий создают формообразующую оснастку, которую затем используют для получения деталей обычными способами.

В данной статье дана краткая сравнительная характеристика АМ-технологий, применяемых для прямого и непрямого изготовления металлических деталей, а также рассмотрен опыт разработки некоторых из этих технологий в БГАТУ.

Прямое изготовление деталей из металлов обычно осуществляется с помощью металлопорошковых (МП) АМ-технологий. К ним относятся, прежде всего, технологии Selective Laser Melting (SLM) и Electron Beam Melting (EBM), согласно которым детали создаются в процессе послойного нанесения металлического порошка на рабочую платформу и его селективного сплавления лазерным или электронным лучом. Также прямое изготов-

ление деталей из металлов проводится подачей металлического порошка непосредственно к месту построения, где послойно происходит лазерная наплавка – технологии Laser Engineered Net Shape (LENS) и Laser Metal Deposition (LMD).

МП-АМ-технологии позволяют создавать детали сложной геометрии, обеспечивая довольно высокую точность и разрешающую способность построения деталей, а также качество их поверхности.

Вместе с тем МП-АМ-технологии имеют ряд недостатков, сдерживающих их применение. Главный их недостаток – высокая стоимость используемых МП-3D-принтеров [1]. Так, большинство 3D-принтеров SLM- и LENS-типов стоят более 500 тыс. долл. США. Стоимость МП-3D-принтеров заметно возрастет с увеличением размеров зоны построения и может достигать до 1 млн долл. США и более. Этим объясняется тот факт, что на сегодняшний день у многих МП-3D-принтеров размеры зоны построения довольно малы, что не позволяет их применять для изготовления крупногабаритных деталей.

Еще один недостаток МП-АМ-технологий – высокая стоимость используемых металлических порошков, которая составляет (в долл. США на 1 кг порошка): для нержавеющей стали – 300, для сплавов Инконель – 400, для титановых сплавов – 500 [1].

Высокая стоимость МП-3D-принтеров сдерживает их приобретение предприятиями для производственных нужд. С другой стороны, высокая стоимость МП-3D-принтеров, а также металлических порошков отражается на стоимости производимых деталей, спрос на которые оказывается ограниченным из-за их высокой цены.

Также недостатком МП-АМ-технологий является присущая им особенность послойного построения деталей, заключающаяся в том, что каждый наращиваемый порошковый слой обычно формируется посточно лазерным или электронным лучом, вследствие чего ограничивается производительность процесса построения деталей.

Непрямое изготовление деталей из металлов с помощью АМ-технологий, как отмечалось выше, предполагает создание

формообразующей оснастки, которую затем используют для получения деталей обычными способами. Как правило, стоимость оснастки, создаваемой по традиционным технологиям, довольно высока (обычно она гораздо выше стоимости изготавливаемых с ее помощью деталей). Кроме того, традиционное создание оснастки требует много времени. В частности, весьма дорогостоящим и трудоемким является изготовление формообразующей литейной и штамповой оснастки. Для снижения стоимости и ускорения процесса изготовления оснастки перспективно применять некоторые виды АМ-технологий.

В литейном производстве для того чтобы отлить единичную металлическую деталь, сначала с помощью 3D-принтера изготавливают литейную модель детали, на которую затем наносят керамическую оболочку. В эту оболочку заливают расплавленный металл и отливают готовую деталь (при этом литейная модель выжигается или выплавляется). Выжигаемые модели получают из полистирола по технологии Selective Laser Sintering (SLS), полиметилметакрилата по технологии Inkjet Printing (IJP), фотополимеров по технологии Stereolithography Apparatus (SLA). Выплавляемые модели получают из модельного материала на основе литейного воска с фотополимерным связующим по технологии Multi-Jet Modeling (MJM). Также выплавляемые модели можно получать из ПВХ-пленок по технологии Laminated Object Manufacturing (LOM).

Для того чтобы отлить небольшую партию металлических деталей, с помощью 3D-принтера изготавливают прототип детали (мастер-модель) из какого-либо материала (термопластика АБС, полистирола, воска, фотополимера или др.), который затем заливают силиконом. После застывания силикона образуется эластичная форма, которую разрезают на две половинки. В полученную разъемную форму заливают литейный воск, в результате чего получается литейная модель. Такую силиконовую форму можно использовать многократно. Обычно этот способ литья применяют для получения 20–50 литых деталей.

АМ-технологии применяются для изготовления песчаных литейных форм. Их получают с помощью SLS-технологии из

литейного (силикатного или циркониевого) песка, плакированного полимером, играющим роль связующего, или с помощью ИР-технологии, когда связующий агент подается каплями на последовательно формируемые слои песка.

В указанных выше примерах с помощью АМ-технологии первоначально создают «промежуточную» литейную оснастку из неметаллических материалов с низкой рабочей температурой, так что общий процесс получения литых деталей оказывается сложным и длительным, состоящим из ряда технологических переделов.

Для непосредственного создания литейной оснастки, обладающей высокой рабочей температурой, можно также применять МП-АМ-технологии. Так, компания InssTek (Южная Корея) производит с помощью LMD-технологии пресс-формы из стали и никель-молибденовых сплавов, предназначенные для литья алюминиевых головок блоков цилиндров двигателя. Также для непосредственного создания металлической литейной оснастки применяют SLM-технологию.

В штамповом производстве при изготовлении деталей нередко оказывается вполне достаточным прикладывать небольшие усилия штампования, так что становится возможным использовать штамповую оснастку из пластика. Ее создают с помощью соответствующих АМ-технологий. Так, матрицы и пуансоны, служащие для штамповки листового металла на листогибочном прессе, получают из жесткой фотополимерной смолы Formlabs Rigid 4000 Resin по SLA-технологии или из термопластика PLA по технологии Fused Deposition Modeling (FDM).

Более перспективно применять АМ-технологии, позволяющие непосредственно создавать металлическую высокопрочную штамповую оснастку, способную работать в условиях больших прессовых нагрузок. В частности, большую прочность имеет металлическая штамповая оснастка, создаваемая с помощью МП-АМ-технологий.

Итак, не прямое изготовление деталей из металлов с помощью АМ-технологий имеет ряд недостатков. Одни виды применяемых АМ-технологий предусматривают создание оснастки

из неметаллических материалов (преимущественно пластиков) с невысокими эксплуатационными свойствами (низкой рабочей температурой в случае литейной оснастки или низкой прочностью в случае штамповой оснастки). Вместе с тем другие виды АМ-технологий, в частности, МП-АМ-технологии, хотя и позволяют напрямую создавать металлическую оснастку с высокими эксплуатационными свойствами, но имеют ограниченное применение из-за высокой стоимости требуемых для их реализации МП-3D-принтеров и металлических порошков.

Таким образом, возникает необходимость в совершенствовании рассмотренных выше АМ-технологий либо в использовании иных, альтернативных АМ-технологий.

В последние годы в БГАТУ изучаются возможности прямого и непрямого изготовления металлических деталей с помощью следующих двух видов АМ-технологий: технологии Sheet Lamination, реализуемой по схеме «cut–stack–bond» (CSB-SL), и особой разновидности технологий экструзионной 3D-печати.

CSB-SL-технология включает следующие операции: контурный раскрой листового металла, пакетирование полученных листовых выкроек в стопку и их соединение между собой. Раскрой листового металла проводится с помощью лазерного станка LaserCUT-1515-6-2-N-RT (Рухсервомотор, Беларусь), листовые выкройки соединяются обычно клеем или болтами.

CSB-SL-технология по сравнению с МП-АМ-технологиями характеризуется более низкой точностью, разрешающей способностью, сложностью геометрии и качеством поверхности создаваемых изделий. Вместе с тем она имеет следующие преимущества:

более низкая стоимость изготовления изделий, поскольку не требуются дорогие 3D-принтеры и металлические порошки, как в МП-АМ-технологиях;

более высокая производительность, поскольку изделие наращивается сразу же готовыми слоями (листовыми выкройками), в отличие от МП-АМ-технологий, когда каждый наращиваемый слой формируется построчно лазерным или электронным лучом;

возможность создавать изделия больших размеров, например 1–2 м и более, которые ограничиваются лишь размерами

раскройного стола лазерного станка для резки листовых металлов, в отличие от МП-АМ-технологий, для которых размеры рабочей зоны МП-3D-принтеров довольно малы;

доступность оборудования и материалов – лазерные станки для резки листовых металлов и листовые металлы повсеместно широко распространены, в то время как МП-3D-принтеры из-за высокой стоимости до сих пор являются большой редкостью.

CSB-SL-технология, разрабатываемая в БГАТУ, предназначена для изготовления как металлических деталей машин, в частности шестерен [2], так и металлической оснастки, в частности штамповой оснастки (матриц и пуансонов), служащей для штамповки листовых металлов [3].

Одной из важных проблем, которую необходимо учитывать при реализации CSB-SL-технологии, является проблема ступенчатого рельефа, образующегося на наклонных и криволинейных поверхностях изделий в силу присущего всем АМ-технологиям послойного характера построения изделий. Особенность CSB-SL-технологии состоит в том, что она, в отличие от других АМ-технологий, позволяет изготавливать изделия из довольно толстых листов материала (толщиной до нескольких миллиметров), благодаря чему значительно повышается производительность изготовления [4]. Однако, с другой стороны, чем больше толщина листов материала, т. е. толщина наращиваемых слоев, тем больше высота ступенек образующегося рельефа. Поскольку ступенчатый рельеф обычно рассматривается как нежелательное явление, свидетельствующее о низком качестве изготовления изделий, то надо предпринимать определенные меры для предотвращения негативного влияния этого рельефа на функциональные свойства изделий.

Так, в случае изготовления по CSB-SL-технологии шестерен следует отдавать предпочтение цилиндрическим прямозубым шестерням, для которых образование ступенчатого рельефа практически исключается, поскольку они не имеют наклонных и криволинейных стенок [2]. Иная ситуация имеет место в отношении цилиндрических косозубых шестерен или конических прямозубых шестерен, для которых необходимо специально рассматривать вопросы возможного влияния ступенчатого ре-

льефа на их функциональные свойства (надежность и характер работы шестерен в зубчатых передачах).

В случае изготовления по CSB-SL-технологии штамповой оснастки для предотвращения негативного влияния ступенчатого рельефа, образующегося на рабочих поверхностях матриц и пуансонов, предложено в процессе штампования покрывать эти поверхности специальными защитными прокладками [3].

Технология экструзионной 3D-печати, разрабатываемая в БГАТУ, по своей сущности близка к технологии Multiphase Jet Solidification (MJS), она предназначена для изготовления литейной оснастки, в частности литейных форм и стержней, служащих для литья металлов [5]. Ее отличительная особенность состоит в том, что из экструдера в место построения изделия подается вязко-текучая пастообразная смесь на основе глины, содержащая мелкодисперсные твердые частицы отошителя. Отошитель снижает усадку полученных из глинистых смесей литейных форм и стержней при сушке, а также повышает вязкость смесей, благодаря чему предотвращается растекание осаждаемых слоев и, соответственно, обеспечивается точное построение изделий требуемой формы и размеров.

Кроме того, отошитель способствует отделению литейных форм и стержней от отливок. Дело в том, что обычные глинистые формовочные и стержневые смеси, служащие для изготовления литейных форм и стержней, обладают существенным недостатком, а именно: изготовленные из них литейные формы и стержни трудно удалить из отливки сложной конфигурации, например, имеющей глубокие карманы, извилистые каналы и т. п. Удаление их путем механического разрушения оказывается недостаточно эффективным, поскольку не удастся полностью извлечь остатки глины из отливки, особенно из ее труднодоступных мест. Вымывание же глины из таких мест водой является весьма длительным процессом, поскольку вода не проникает вглубь объема глины, а контактирует с ней только по ограниченным участкам открытой поверхности, в результате чего диспергирование глины и унос ее частиц водой происходит медленно. Это обусловлено тем, что глина характеризуется водонепропу-

скаемостью (является устойчивым гидроизолятором). Введение же отошителя в глинистую смесь существенно облегчает вымывание глины. Особенно значительный эффект достигается при использовании водорастворимых отошителей, благодаря чему значительно повышается как скорость, так и полнота отделения литейных форм и стержней от отливок путем вымывания водой.

Разрабатываемая технология экструзионной 3D-печати характеризуется технической простотой и низкой стоимостью реализации по аналогии с другими АМ-технологиями, предназначенными для изготовления литейной оснастки из неметаллических материалов. Вместе с тем по сравнению с другими аналогичными по назначению АМ-технологиями она имеет следующие преимущества:

появляется возможность изготавливать «конечную» литейную оснастку, обладающую высокой рабочей температурой, так что общий процесс получения литых деталей существенно упрощается и сокращается во времени, поскольку изготовленная (напечатанная) литейная оснастка может непосредственно использоваться для литья деталей из металлов, например, из алюминия;

литейная оснастка изготавливается (печатается) из широко распространенных и дешевых материалов;

удаление литейной оснастки после завершения литья (ее отделение от отливки) осуществляется промывкой водой, при этом обеспечивается быстрое и полное удаление остатков стержней из самых труднодоступных мест внутренних полостей отливки;

весь процесс изготовления литейной оснастки и ее последующего использования при получении металлических отливок характеризуется экологической чистотой.

Таким образом, АМ-технологии, традиционно применяемые для прямого и косвенного изготовления металлических деталей, наряду с преимуществами, имеют недостатки, сдерживающие их широкое распространение. Поэтому практически важно заниматься их совершенствованием, определять наиболее перспективные направления их использования. Вместе с тем необходимо уделять все более значительное внимание разработке и освоению новых, нетрадиционных АМ-технологий.

Список использованных источников

1. Прямое изготовление металлических деталей с помощью аддитивной технологии листового ламинирования / Н. К. Толочко [и др.] // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп., Минск, 29 сент. 2021 г. / Нац. акад. наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2021. – С. 208–218.
2. Проблема ступенчатого рельефа при изготовлении шестерен по аддитивной технологии листового ламинирования / Н. К. Толочко [и др.] // Агронарама. – 2022. – № 1. – С. 2–7.
3. Штмп для листовой штамповки : пат. ВУ 23392 / Н. К. Толочко, Н. Н. Романюк, О. В. Сокол. – Опубл. 28.02.2021.
4. Толочко, Н. К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Н. К. Толочко, О. В. Сокол // Вестник машиностроения. – 2020. – № 10. – С. 11–15.
5. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве / Н. К. Толочко [и др.] // Литье и металлургия. – 2018. – №. 4. – С. 139–144.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПОЛЯ И ПОТОКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

**М. Л. Хейфец¹, Д. С. Ратуцкая^{1,2}, В. С. Крутько²,
Н. Л. Грецкий²**

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

²ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Рассмотрено использование критериев переноса для анализа процессов формирования структур и фаз, многократно сокращающие объем экспериментальных исследований при проектировании процессов и оборудования аддитивного производства. Показано, что моделирование совместных электромагнитных и термомеханических воздействий при проектировании технологических процессов и оборудования базируется на критериях тепло-, и массопереноса, электро-, и физико-химического взаимодействия, определяет основные технологические факторы и связывает геометрические и физико-механические параметры качества с производительностью обработки.