

УДК 621.77.04

Толочко Н.К., доктор физико-математических наук, профессор,
Авраменко П.В., кандидат технических наук, доцент,

Кравцов В.Б.

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск. Республика Беларусь*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

***Аннотация.** Обсуждены особенности аддитивного изготовления металлических деталей машин и формообразующей оснастки. Рассмотрены основные направления деятельности БГАТУ по применению аддитивной технологии листового ламинирования при производстве сельхозтехники.*

В последние годы в машиностроении получают все более широкое распространение аддитивные технологии (АМ-технологии – от англ. Additive Manufacturing). Их применяют при создании различных деталей машин. При этом с их помощью изготавливают как готовые детали, так и формообразующую оснастку, которую затем используют для получения деталей обычными способами.

Особый практический интерес представляют такие АМ-технологии, которые позволяют создавать и готовые детали, и формообразующую оснастку непосредственно из металлов. На сегодняшний день известно всего лишь два типа таких АМ-технологий, несмотря на их большое разнообразие в целом. Это – металлопорошковые (Metal Powder, MP) АМ-технологии (MP-АМ-технологии) и технологии листового ламинирования (Sheet Lamination, SL), основанные на использовании листовых металлов (Metal, M) в качестве исходных заготовок (MSL-АМ-технологии).

В начале 2022 г. в России, а также в Беларуси возросло внимание к использованию АМ-технологий как к одному из возможных путей решения проблем, вызванных санкционной политикой США, стран Евросоюза и ряда других стран и связанных с ограничениями зарубежных поставок комплектующих деталей для производства

машин, и запасных деталей для ремонта машин. Особенно острый характер эти проблемы приобрели в России, где в связи с этим наблюдается заметная активизация деятельности по более широкому применению АМ-технологий для производственных и ремонтных нужд [1] и по усиленной подготовке специалистов для работы в сфере АМ-технологий [2]. Решение этих проблем осложняется тем, что Россия выпускает сравнительно небольшое количество АМ-оборудования. Так, на российском рынке 3D-принтеров, печатающих по МР-АМ-технологиям, имеется около 200 единиц оборудования, из которых 80% поставлено из-за рубежа – из США, Европы (в основном Германии), КНР, Японии и других стран, 20 % – отечественного производства [1]. Некоторые страны в рамках запрета на экспорт в Россию высокотехнологичного оборудования сократили поставки 3D-принтеров, например, Япония прекратила поставлять не только МР-3D-принтеры, но также используемые для 3D-печати металлические порошки [3]. Как следствие, возникает необходимость ускоренного расширения выпуска на российских предприятиях АМ-оборудования и исходных АМ-материалов.

Дадим сравнительную характеристику указанных выше типов АМ-технологий, позволяющих создавать готовые детали и формообразующую оснастку непосредственно из металлов.

К МР-АМ-технологиям относятся Selective Laser Melting (SLM) и Electron Beam Melting (EBM) (изделия создают послойным нанесением металлического порошка на рабочую платформу и его селективным сплавлением лазерным или электронным лучом), а также Laser Engineered NetShape (LENS) и Laser Metal Deposition (LMD) (изделия создают подачей металлического порошка непосредственно к месту построения, где происходит его лазерная наплавка).

МР-АМ-технологии позволяют создавать изделия сложной геометрии с довольно высокой точностью и разрешающей способностью построения, а также качеством поверхности. Главный их недостаток – высокая стоимость МР-3D-принтеров [4]. Так, большинство 3D-принтеров SLM- и LENS-типов стоят более 500 тыс. долл. США. Их стоимость заметно растет с увеличением размеров зоны построения и доходит до 1 млн. долл. США и более. Этим объясняется тот факт, что на сегодняшний день у многих МР-3D-принтеров размеры зоны построения довольно малы, что не позволяет их

применять для изготовления крупногабаритных деталей. Еще один их недостаток – высокая стоимость металлических порошков: для нержавеющей сталей – 300, для сплавов Инконель – 400, для титановых сплавов – 500 (в долл. США на 1 кг) [4].

Высокая стоимость МР-3D-принтеров сдерживает их приобретение предприятиями для производственных нужд. С другой стороны, высокая стоимость МР-3D-принтеров и металлических порошков отражаются на стоимости производимых изделий, спрос на которые оказывается ограниченным из-за их высокой цены.

Также недостатком этих технологий является присущая им особенность послойного построения изделий, заключающаяся в том, что каждый наращиваемый порошковый слой обычно формируется построчно лазерным или электронным лучом, вследствие чего ограничивается производительность процесса построения изделий.

MSL-AM-технология имеет три разных вида: «паketирование – резка – соединение» («stack-cut-bond», SCB); «паketирование – соединение–резка» («stack-bond-cut», SBC); «резка – паketирование – соединение» («cut-stack-bond», CSB) [5]. Примеры реализации разных вариантов SCB-SL-AM-технологии даны ниже.

Вариант SCB-Solder: металлические листы поочередно паketируют и разрезают лазером, листовые выкройки покрывают слоем паяльной пасты, затем стопку выкроек сжимают и нагревают, в результате чего между выкройками создается паяное соединение.

Вариант SCB-D-Weld: металлические листы поочередно паketируют и разрезают лазером, выкройки соединяют диффузионной сваркой, для чего стопку выкроек прессуют в печи.

Вариант SBC-Glue: металлические листы, покрытые слоем термоактивируемого клея, поочередно паketируют и склеивают, после чего разрезают лазером (эта технология известна под названием Laminated Object Manufacturing – LOM).

Вариант SBC-US-Weld: металлические листы поочередно паketируют и селективно сваривают ультразвуком, после чего разрезают фрезой (эта технология известна под названием Ultrasonic Additive Manufacturing – UAM).

Вариант CSB-Screw: из металлических листов лазером или фрезой вырезают выкройки с отверстиями для фиксации и крепления, затем выкройки паketируют и стягивают болтами.

Построение по схемам SCB и SBC ведется автоматизировано с помощью SL-3D-принтеров, в которых в силу особенностей их ра-

боты в качестве исходного строительного материала используется тонкая металлическая фольга (как правило, в рулонах).

Так как в случае схем SCB и SBC листы подвергаются резке, когда они уже уложены в стопку, то во время резки проводится не только контурный раскрой листов, но и разделение их неиспользованной части на фрагменты, что позволяет после завершения построения удалить отходы металла и тем самым обеспечить беспрепятственное снятие построенной детали с рабочей платформы.

При построении по схеме CSB в качестве исходного материала используются дискретные металлические листы, которые кроят с помощью лазерных или фрезерных раскройных станков. Последующее пакетирование листовых выкроек и их болтовое соединение трудно поддаются автоматизации, поэтому обычно эти операции выполняют вручную. Листы, используемые при построении по схеме CSB, в силу особенностей обращения с ними должны обладать определенной жесткостью, поэтому их толщина, как правило, значительно больше, чем у металлической фольги.

При построении по схеме CSB имеется возможность более рационально расходовать листовой металл благодаря тому, что при его раскрое можно делать компактную компоновку выкроек, так что отходы металла предельно минимизируются, чего нельзя обеспечить при построении по схемам SCB и SBC.

Изготовление изделий из металла по SL-технологии при определенных условиях может быть экономически более выгодным, чем по другим AM-технологиям. Наиболее значительный экономический эффект применения SL-технологии может быть достигнут в том случае, когда построение изделий идет по схеме CSB. Поэтому представляет практический интерес дальнейшее совершенствование SL-технологии прямого изготовления металлических изделий и прежде всего тех его вариантов, которые предусматривают построение изделий по схеме CSB.

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

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

В последнее время вопросы изготовления металлических изделий с помощью CSB-SL-АМ-технологии являются предметом повышенного внимания в БГАТУ. Как отмечалось выше, CSB-SL-АМ-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, РБ), листовые выкройки соединяются обычно клеем или болтами.

В 2022 г. в БГАТУ начали проводиться научные исследования и технические разработки в области изготовления деталей сельхозтехники с помощью CSB-SL-АМ-технологии совместно с Минским заводом шестерен (МЗШ) в рамках Договора о сотрудничестве. Планируются вести работы в двух основных направлениях: 1) изготовление готовых деталей – шестерни, грядилы плуга и 2) изготовление формообразующей оснастки – штамповая оснастка для получения листовой штамповкой отвалов предплужника и плуга (в том числе сменных сегментов перьевых отвалов), а также дисковых ножей плуга.

В рамках выполняемых работ предполагается изучить принципиальные возможности и технико-экономическую эффективность использования CSB-SL-АМ-технологии для изготовления указанных видов изделий, а именно: шестерен и грядилей, а также формообразующих элементов штамповой оснастки (матрицы и пуансона), которые будут обладать разной конфигурацией, а также слоистой

(многолистовой) конструкцией, характеризующейся уменьшенной массой за счет топологической оптимизации конструкции.

Список использованных источников

1. Металлургия в 3D. Что изменят санкции для аддитивных технологий. 2022. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.prometall.info/know-how/metallurgiya_v_3d. – Дата доступа: 28.09.2022.

2. ДВФУ запускает обучение специалистов в области аддитивных технологий. 2022. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/dvfu-zapuskayet-obucenie-specialistov-v-oblasti-additivnykh-tekhnologii>. – Дата доступа: 28.09.2022.

3. Япония запретит экспорт в Россию 3D-принтеров и высокотехнологичного оборудования. 2022. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/politics/news/2022/05/13/921878-yaponiya-s-20-maya-zapretit-eksport-v-rossiyu-3d-printerov-i-visokotekhnologichnogo-oborudovaniya>. – Дата доступа: 28.09.2022.

4. Прямое изготовление металлических деталей с помощью аддитивной технологии листового ламинирования / Н.К. Толочко, Н.Н. Романюк, П.В. Авраменко, О.В. Сокол // 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. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2021. – С. 208–218.

5. Толочко, Н.К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Вестник машиностроения. – 2020. – №10. – С. 11–15.

Abstract. The features of additive manufacturing of metal parts of machines and forming tools are discussed. The main directions of activity of BSATU on the use of sheet lamination additive technology in the production of agricultural machinery are considered.