

УДК621.77.04

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЯМОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Толочко Н.К., д.ф.-м.н., профессор, Сокол О.В.
БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь

Аддитивные технологии (АМ-технологии – от англ. Additive Manufacturing – аддитивное производство), или технологии 3D-печати, позволяют сравнительно быстро создавать сложные по форме изделия из разных материалов. В последние годы они все шире применяются в машиностроении, а также в ремонтном производстве. Известны разнообразные виды АМ-технологий, которые различаются принципами построения изделий, конструктивными и функциональными особенностями технологического оборудования (3D-принтеров), составом и свойствами расходных материалов, а также фирменными названиями. Особый практический интерес представляют те из них, которые позволяют создавать непосредственно из металла как готовые детали машин, так и используемые для их получения формообразующую оснастку и инструмент.

АМ-технологии прямого изготовления изделий из металла основаны на термообработке металлического порошка или проволоки. По принципам построения изделий они делятся на две группы: Bed Deposition (BD) и Direct Deposition (DD). Построение изделий по BD-АМ-технологиям идет путем послойного нанесения металлического порошка на рабочую платформу и его селективного сплавления лазерным или электронным лучом – соответственно Selective Laser Melting (SLM) и Electron Beam Melting (EBM). Реже применяется плазменное сплавление – Ion Fusion Formation (IFF). Построение изделий по BD-АМ-технологиям идет путем подачи металлического порошка или проволоки непосредственно к месту построения, где послойно проводится лазерная наплавка – Laser Engineered Net Shape (LENS) (порошок) и Laser Metal Deposition (LMD) (порошок или проволока) либо электронно-лучевая наварка – Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM) (проволока). Реже применяется электродуговая наварка – Gas Metal Arc Welding (GMAW) (проволока).

Хотя АМ-технологии прямого изготовления изделий из металла известны давно (их разработка ведется с начала 1990-х годов), до сих пор они не получили широкого распространения. Главная тому причина – высокая стоимость металлических 3D-принтеров: многие из них имеют цену выше 500 000 долл. США, а некоторые – выше 1 миллиона долл. США (табл. 1). Довольно дорогими являются и расходные металлы, используемые для 3D-печати. Так, стоимость 1 кг порошка составляет: титан – 500, сплав Inconel – 400, нержавеющая сталь – 300 долл. США. Стоимость металлической проволоки также довольно высока, она приблизительно лишь в 1,5 раза меньше стоимости порошка. Как правило, стоимость металлических 3D-принтеров заметно повышается с размерами максимальной зоны построения. Этим объясняются сравнительно небольшие размеры максимальной зоны построения у многих 3D-принтеров, которые обычно не превышают значений $300 \times 300 \times 300$ мм³.

Таблица 1. Характеристика АМ-технологии прямого изготовления изделий из металла

Вид технологии	Модель 3D-принтера	Фирма-изготовитель	Макс. зона построения, мм ³	Стоимость, тыс. долл. США
SLM	SLM125	SLM-Solutions, Германия	120×120×80	~800
	EOSM 290	EOS, Германия	250×250×325	~700
LENS	LENS 850-R	Optomec, США	900×1500×900	~1200
EBM	Arcam EBM Q10plus	Arcam, Швеция	200×200×180	~500
EBDM	Sciaky DM	Sciaky, США	5700×1200×1200	>2000

Еще одним фактором высокой стоимости как самих металлических 3D-принтеров, так и их эксплуатации является необходимость использования специальных рабочих сред – инертных газов или вакуума.

Характерной особенностью AM-технологий прямого изготовления изделий из металла является наращивание каждого слоя последовательным формированием и пристраиванием друг к другу отдельных фрагментов, что обусловлено локальным характером воздействия лазерного или электронного луча на металлический порошок или проволоку. Тем самым ограничивается скорость построения. Дополнительно ее ограничению способствует целенаправленное уменьшение толщины наращиваемых слоев с целью повышения точности построения, что ведет к соответствующему увеличению числа слоев.

С учетом отмеченных выше проблем прямого изготовления изделий из металла с использованием AM-технологий обращает на себя внимание особая разновидность этих технологий – Metal Sheet Lamination (MSL) – листовое ламинирование металла. Отличительная особенность MSL-технологии состоит в том, что расходные металлы используются не в виде порошков или проволок, а в виде листов и, соответственно, наращиваемые слои создаются не последовательно-фрагментарным способом, а сразу же целиком – путем контурного раскроя листов лазерным лучом или лезвийным инструментом. При этом изготовление изделий происходит путем пакетирования и соединения между собой полученных листовых выкроек определенной конфигурации.

Существуют два варианта реализации MSL-технологии: «stack-bond-cut» (SBC) – «пакетирование-соединение-раскрой» и «cut-stack-bond» (CSB) – «раскрой-пакетирование-соединение» [1]. Наиболее распространена SBC-MSL-технология, известная под названием Laminated Object Manufacturing (LOM). Она реализуется с помощью 3D-принтеров, в которых металлическая фольга периодически подается из рулона на рабочую платформу, где лазер делает из листов контурные выкройки, дозатор наносит на выкройки паяльную пасту, а ролик разглаживает пасту в равномерный слой. Каждая вновь создаваемая выкройка спаивается с предыдущей за счет прижимания нагретой пластиной. В последние годы получила развитие SBC-MSL-технология, известная под названием Ultrasonic additive manufacturing (UAM). Она реализуется с помощью 3D-принтеров, отличающихся тем, что в них контурные выкройки из металлической фольги соединяются ультразвуковой сваркой. Однако 3D-принтеры, применяемые в SBC-MSL-технологии, имеют довольно высокую стоимость, хотя она все же меньше, чем у других типов металлических 3D-принтеров. Например, UAM-3D-принтер SonicLayer R1200 фирмы Fabrisonic с размером максимальной зоны построения $255 \times 255 \times 255 \text{ мм}^3$ стоит ~200 тыс. USD.

Поскольку SBC-MSL-технологии основаны на использовании тонкой (~ 0,1 мм) металлической фольги, то общее количество слоев, необходимых для построения, оказывается довольно большим, что ведет к существенному повышению длительности изготовления.

Более дешевым и производительным является изготовление изделий по CSB-MSL-технологии, реализация которой осуществляется без применения специальных дорогостоящих 3D-принтеров. Согласно этой технологии из металлических листов лазером или фрезой вырезают выкройки, которые затем пакетируют и соединяют между собой болтами, клеем, пайкой или сваркой. При этом основным применяемым оборудованием являются лазерные или фрезерные станки, с помощью которых выполняется контурный раскрой металлических листов. Это оборудование имеется на многих промышленных предприятиях, которые обычно оказывают услуги по контурному раскрою по вполне приемлемым ценам. Металлические листы легкодоступны, а их цена обычно не превышает нескольких долл. США за 1 кг, т.е. они гораздо дешевле, чем металлические порошки или проволоки, применяемые в других видах AM-технологий прямого изготовления изделий из металла.

С целью снижения продолжительности и стоимости изготовления изделий по CSB-MSL-технологии можно использовать сравнительно толстые листовые выкройки (толщиной в несколько мм). Однако это ведет к образованию нежелательного ярко выраженного ступенчатого рельефа поверхности изделий [2]. Для его сглаживания применяют разные спосо-

бы пост-обработки. Эффективным решением данной проблемы является разработка оригинальных технических подходов, направленных на предотвращение его негативного влияния на эффективность эксплуатации изготавливаемых изделий [3].

Литература

1. Толочко, Н.К. Прямое изготовление металлических деталей с применением LOM-технологии / Н.К. Толочко, А.А. Андрушевич, П.С. Чугаев, Т.А. Богданович // Литье и металлургия. – 2018. – №1. – С. 137-143.
2. Толочко, Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности /Н.К. Толочко, О.В. Сокол //Агропанорама, 2019. №2. С. 12-16.
3. Толочко, Н.К. Листовая штамповка металлов с помощью штампов, изготовленных с использованием аддитивной LOM-технологии /Н.К. Толочко, О.В. Сокол //Агропанорама, 2019, №4, с. 19-21.

ЗАВИСИМОСТЬ МАКСИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ УДАЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ОТРАБОТАННОМ МОТОРНОМ МАСЛЕ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРИФУГИ

Капцевич В.М., д.т.н., профессор, **Корнеева В.К.**, к.т.н.,
Закревский И.В., **Зыков Н.Д.**
БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь

Известно, что двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – один из наиболее сложных и дорогостоящих агрегатов тракторов, комбайнов и другой сельскохозяйственной техники. В процессе эксплуатации он вырабатывает свой моторесурс, поэтому его подвергают капитальному ремонту на мотороремонтных предприятиях с целью продления срока службы, что создает экономию энергетических ресурсов и денежных средств. В процессе такого ремонта производят замену или восстановление изношенных деталей и обкатку двигателя.

Обкатка ДВС является завершающей операцией, во многом определяющая его дальнейший послеремонтный ресурс. В процессе обкатки ДВС интенсивность износа выше, чем при нормальных условиях его эксплуатации. Это связано с тем, что за время технологической обкатки в моторное масло ДВС поступает наибольшее количество продуктов износа, а также эксплуатационные и ремонтно-технологические загрязнения. На этом этапе в масло также попадают загрязнения из воздуха и генерируются продукты неполного сгорания топлива.

После обкатки отработанное моторное масло утилизируется либо используется на другие нужды. Следует отметить, что по многим параметрам отработанное масло еще имеет достаточный запас эксплуатационных свойств, но в то же время содержание механических примесей в нем в 1,5–2 раза превышает предельное значение [1].

Наиболее опасными частицами загрязнений, присутствующими в моторном масле после обкатки двигателей, являются частицы SiO_2 , Al_2O_3 , стали с размером более 5 мкм [2]. Анализ способов очистки моторных масел показывает, что для наиболее полного удаления из них механических примесей целесообразно использовать центробежную очистку [3–5]. Центробежные очистители (центрифуги) просты в эксплуатации и обслуживании, обладают высокой улавливающей способностью, работают в широком диапазоне температур, имеют практически неограниченный срок службы, а их грязеемкость значительно выше грязеемкости фильтрующих материалов.

При центробежной очистке избирательная способность центрифуг зависит от следующих параметров: свойств очищаемого масла, размеров и природы частиц загрязнений, геометрических параметров и режимов работы центрифуги. В работе [6] нами были определены зависимости максимальных размеров удаляемых частиц загрязнений, присутствующих в моторных маслах, от частоты вращения центрифуги, толщины масляного слоя и скорости (расхода) очищаемого масла.