



УДК 621.77.04

Поступила 06.02.2018

ПРЯМОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ LOM-ТЕХНОЛОГИИ

Н. К. ТОЛОЧКО, А. А. АНДРУШЕВИЧ, П. С. ЧУГАЕВ, Т. А. БОГДАНОВИЧ, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2. E-mail: n.tolochko@hotmail.com, andru49@mail.ru

Приведен краткий обзор основных видов аддитивных технологий, обеспечивающих прямое изготовление деталей из металла. Рассмотрены особенности прямого изготовления металлических деталей с использованием LOM-технологии в сравнении с другими аддитивными технологиями. Выполнен анализ различных способов соединения пакетированных листовых металлов в процессе изготовления LOM-деталей, включая способы механического, клевого, сварного и паяного соединений. Обсуждены достоинства и недостатки каждого из этих способов. Экспериментально продемонстрированы возможности соединения пакетированных листовых металлов посредством сварки и пайки.

Ключевые слова. LOM-технология, аддитивная технология, металлическая деталь, соединение листовых металлов.

DIRECT MANUFACTURING OF METAL PARTS USING LOM-TECHNOLOGY

N. K. TOLOCHKO, A. A. ANDRUSHEVICH, P. S. CHUGAEV, T. A. BOGDANOBICH, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, 99/2, Nezavisimosti ave. E-mail: n.tolochko@hotmail.com, andru49@mail.ru

A brief review of the main types of additive technologies providing direct manufacturing of metal parts was carried out. Peculiarities of direct manufacturing of metal parts using LOM-technology (laminated object manufacturing) are compared with other additive technologies. Different methods of juncture stacked sheet metals during fabrication of LOM-parts, including methods of mechanical, adhesive, welded and soldered juncture were analyzed. The advantages and disadvantages of each of these methods were considered. The possibilities of juncture sheet stacked metals by welding and soldering were demonstrated experimentally.

Keywords. LOM-technology (laminated object manufacturing), additive technology, metal part, juncture of sheet metals.

Аддитивные технологии начали интенсивно развиваться на рубеже 80–90-х годов и в настоящее время получили довольно большое распространение во многих странах. С их применением связываются революционные изменения в промышленном производстве [1]. В последние годы они все шире применяются в Беларуси.

Аддитивные технологии – это обобщенное название технологий изготовления трехмерных (3D) изделий по их компьютерным моделям путем последовательного (как правило, послойного) добавления материала – в противоположность традиционным субтрактивным технологиям, предусматривающим достижение требуемой формы изделия путем удаления материала с заготовки в результате ее механической, электроэрозионной и другой обработки [2]. Первоначально эти технологии называли технологиями быстрого прототипирования, поскольку в основном они предназначались для создания прототипов изделий. На сегодняшний день технологии быстрого прототипирования рассматриваются как часть аддитивных технологий, которые позволяют создавать не только прототипы изделий, но и готовые изделия. Часто аддитивные технологии называют технологиями 3D-печати; соответственно устройства, с помощью которых они реализуются, называют 3D-принтерами.

Известно несколько десятков разновидностей аддитивных технологий, которые различаются как особенностями процессов создания 3D-изделий, так и особенностями конструкции и функционирования 3D-принтеров. Кроме того, они имеют разнообразные фирменные названия.

Аддитивные технологии находят большее применение в машиностроении, прежде всего для создания деталей сложных форм. Поскольку большинство деталей машин, а также деталей технологической оснастки являются металлическими, то особый интерес представляют такие аддитивные технологии, которые позволяют напрямую создавать детали из металла. К ним относятся различные виды технологий, основанных на термообработке металлического порошка или проволоки (табл. 1). Среди них наи-

более распространены технологии, в которых нагрев осуществляется лазерным (SLS, SLM, LMD, LENS) или электронным (EBM, EBF) лучом. Меньшее распространение получили технологии, где для термообработки используется плазма (IFF) или электродуговой разряд (GMAW).

Таблица 1. Основные разновидности аддитивных технологий, обеспечивающих прямое изготовление деталей из металла

Название технологии	Краткая характеристика технологии
Selective Laser Sintering (SLS)	Металлический порошок наносится послойно на платформу, каждый слой подвергается селективному спеканию лазерным лучом, сканирующим поверхность порошкового слоя
Selective Laser Melting (SLM)	Металлический порошок наносится послойно на платформу, каждый слой подвергается селективному плавлению лазерным лучом, сканирующим поверхность порошкового слоя
Laser Metal Deposition (LMD)	Металлический порошок или проволока подается непосредственно к месту построения изделия и подвергается лазерной послойной наплавке
Laser Engineered Net Shape (LENS)	Осуществляется по аналогии с LMD, отличие состоит в том, что в зону лазерного плавления могут подаваться не один вид, а два или более видов металлических порошков, в результате получаются изделия с градиентным составом
Electron Beam Melting (EBM)	Осуществляется по аналогии с SLM, отличие состоит в том, что металлический порошок подвергается переплавке под действием электронного, а не лазерного луча
Electron Beam Freeform Fabrication (EBF)	Осуществляется по аналогии с EBM, отличие состоит в том, что металл подается в зону электронно-лучевого плавления в виде проволоки, а не порошка
Ion Fusion Formation (IFF)	Осуществляется по аналогии с EBM, отличие состоит в том, что в качестве источника энергии для плавления порошка используется плазматрон, ионизирующий инертный газ и генерирующий поток плазмы
Gas metal arc welding (GMAW)	Осуществляется по аналогии с EBF ₃ , отличие состоит в том, что в качестве источника энергии для плавления проволоки используется электрическая дуга
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Металлические листы подвергаются контурному раскрою, полученные листовые выкройки пакетируются и соединяются друг с другом

Указанные технологии имеют характерную особенность, которая состоит в том, что каждый наращиваемый слой создается путем последовательного формирования и пристраивания друг к другу отдельных фрагментов, соответствующих по размерам зонам термообработки расходных материалов – металлического порошка или проволоки. От них принципиально отличается LOM-технология, в которой расходные материалы используются в листовом виде и соответственно наращиваемые слои создаются не последовательно-фрагментарным способом, а сразу же целиком – путем контурного раскроя листов расходных материалов.

Следует однако заметить, что LOM-технология до сих пор применяется в основном для изготовления изделий из бумаги или пластиковой пленки [4]. Такие изделия обычно получают следующим образом. Расходный листовый материал с предварительно нанесенным на его поверхность термоактивным клеем периодически подается из рулона на рабочую платформу, где лучом лазера вырезаются контуры поперечных сечений создаваемого изделия. При этом часть лишнего материала разрезается на мелкие кусочки для последующего удаления. Оставшийся материал скатывается в отработанный рулон и также подлежит удалению. Каждая вновь создаваемая листовая выкройка склеивается с предыдущей за счет прокатки нагретым роликом. В результате получается многослойное изделие определенной конфигурации.

Изготовленные по LOM-технологии бумажные или пластиковые изделия идеально подходят для решения задач, требующих оценки формы и внешнего вида изделий, а также для проверки их собираемости; кроме того, они могут использоваться в качестве разовых выжигаемых моделей в литейном производстве [4].

Что же касается применения LOM-технологии для прямого изготовления изделий из металла, то на сегодняшний день оно не получило широкого распространения, несмотря на то что создание металлических изделий путем пакетирования и соединения листовых металлических выкроек имеет многолетнюю историю. Одной из основных причин этого является до конца не решенная проблема эффективного соединения пакетируемых металлических листовых выкроек, обеспечивающего требуемые эксплуатационные свойства получаемых изделий. Данная статья посвящена краткому рассмотрению современного состояния этой проблемы.

Пожалуй, первым, кто предложил применять LOM-технологию для изготовления металлических деталей сложной формы, в частности штампов для штамповочных прессов и кулачков для кулачковых ме-

ханизмов, был Di Matteo (США) [5], запатентовавший в 1974 г. способ создания 3D-объектов, согласно которому металлические листы разрезают по заданным контурам лазером или фрезой, а полученные выкройки укладывают в стопку и соединяют между собой с помощью болтов.

Болтовые соединения металлических листов отличаются технической простотой реализации и обеспечивают довольно прочное прижатие листов друг к другу. Для осуществления таких соединений в каждой листовой выкройке предварительно просверливаются в определенных местах отверстия, которые, совмещаясь друг с другом при последующем пакетировании выкроек, образуют сквозные отверстия, проходящие через всю стопку. В эти отверстия вставляются болты, на которые навинчиваются гайки.

Характерным примером реализации LOM-технологии на основе использования болтовых соединений металлических листов является работа Alami (Иордания) [6], посвященная получению пресс-форм для формования образцов из глины с целью определения механических свойств глиняных кирпичей. Пресс-формы создавали из стальных листов толщиной 1 и 3 мм, в каждом из которых с помощью станка с ЧПУ вырезали центральное отверстие диаметром 50 мм – для последующего создания формообразующей цилиндрической полости, а также четыре крепежных отверстия диаметром 9 мм – для установки болтов. Кроме того, для обеспечения точной укладки листов в каждом из них делали два выравнивающих отверстия диаметром 8 мм. Стопка листов имела высоту 40 мм.

Walczuk и др. (США) [7–9], исследуя возможности применения LOM-технологии для изготовления металлической формообразующей оснастки, предложили использовать болтовые соединения для жесткой фиксации металлических листовых выкроек в специальной зажимной раме, где обеспечивалась их строго упорядоченная укладка в стопку. Такая групповая фиксация выкроек позволяла проводить их совместную механическую обработку по поверхностям, образованным кромками выкроек. Кроме того, благодаря тому что конструкция стянутых болтами листов являлась разборной, можно было в процессе разработки пресс-форм легко извлекать отдельные листы из стопки для дополнительной доработки или замены на другие листы с целью обновления формообразующих поверхностей пресс-форм.

Несмотря на ряд достоинств, болтовые соединения не получили широкого применения при изготовлении металлических изделий по LOM-технологии. В частности, с помощью таких соединений можно создавать пресс-формы для формования листового металла, но они оказываются непригодными для создания пресс-формы для литья под давлением из-за возможной утечки расплава через зазоры между слоями [7–9].

Еще одним видом соединения металлических листов, который находит применение в LOM-технологии и так же как и болтовые соединения отличается технической простотой реализации, является соединение посредством адгезивов. Так, Zak и Wang (Канада) [10] изготавливали многослойные изделия путем пакетирования стальных листов толщиной 0,12 мм, которые соединяли двухсторонней клейкой пленкой марки Scotch 3M 467MP под действием давления, создаваемого нагретым роликом. Walczuk и Dolan (США) [6] проводили испытания на прочность многослойных изделий, изготовленных из алюминиевых пластин, которые соединяли между собой эпоксидным клеем, равномерно распределенным по их поверхности. Испытания показали, что все образцы разрушались по схеме полного или частичного когезионного разрушения, что свидетельствует о высокой прочности клеевого соединения. Имевшее место в ряде случаев частичное когезионное разрушение могло быть связано со следующими причинами: поверхности пластин были недостаточно подготовлены, т. е. не были полностью очищены от загрязнений; зазоры между склеиваемыми поверхностями были неравномерны; в процессе изготовления изделий на поверхность пластин попадали загрязняющие вещества.

К недостаткам клеевых соединений, ограничивающим их применение при изготовлении металлических изделий по LOM-технологии, относятся невысокая теплостойкость и теплопроводность, повышенная горючесть [11].

Анализ исследований в области LOM-технологии показывает, что для соединения металлических листов в основном используются сварка и пайка.

В 1979 г. Nakagawa и др. (Япония) [12–14] начали впервые применять диффузионную сварку для соединения сделанных лазером выкроек из листовой стали при изготовлении ряда формовочных инструментов: вырубных и вытяжных штампов, пресс-форм для прессового и литейного оборудования. Позднее LOM-технология, основанная на использовании диффузионной сварки, получила развитие в работах Yi и др. (Китай) [15, 16], Precht и др. (Германия) [17].

Диффузионно-сварочное соединение пакетированных металлических листов происходит в результате их прессования при высокой температуре в течение определенного времени, достаточного для того,

чтобы листы соединились по всей площади с полным закрытием всех микроскопических пор на границе раздела [14, 17]. При этом может быть достигнута весьма высокая прочность соединения листов, сопоставимая с прочностью самих листов. Так, Nakagawa и др. [13] диффузионно сваривали 55 листов холоднокатаной стали путем их совместного нагревания в вакууме при температуре 1100 °С и последующего прессования при давлении 5,9 МПа в течение 1 ч. В результате обеспечивалось соединение листов без видимых линий раздела с прочностью связи, достигающей до 100% от прочности исходного материала.

Наряду с достоинствами диффузионно-сварочный процесс соединения листовых металлов имеет недостатки [6]. К ним относятся ограниченная применимость процесса к конкретным комбинациям материалов (в основном диффузионной сварке подвергают стальные листы), большая длительность процесса, необходимость специальной подготовки свариваемых поверхностей, потребность в сложном прессовом оборудовании, работающем при высоких температурах (приблизительно 2/3 температуры плавления исходного металла).

В отдельных работах, посвященных LOM-технологии, для соединения металлических листов использовали лазерную сварку [18] и контактную электросварку [19]. В частности, в работе [19] экспериментально показана возможность быстрого соединения с помощью контактной электросварки пакетированных листов из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм при изготовлении литейной формы для инъекционного литья пластмасс.

Соединение металлических листов в LOM-технологии пайкой получило более широкое распространение, чем сваркой. Пайка позволяет соединять листы большой площади, оказывает минимальное влияние на состав основного материала, проявляет более высокую устойчивость к несогласованным поверхностям, чем диффузионная сварка, поскольку припоем заполняются пустоты и зазоры, имеющиеся на границе раздела [6].

В 1998 г. Obikawa (Япония) [20, 21] одним из первых применил пайку для соединения листовых металлов в LOM-технологии. Он осуществлял спаивание стальных листов толщиной 0,2 мм, покрытых с обеих сторон слоем припоя толщиной 40 мкм. Позднее Bryden и Pashby (Великобритания) [21] предложили использовать пайку при изготовлении слоистых инструментов, а Yoop и Na (Южная Корея) [23] показали, что пайка является эффективным средством получения слоистых штампов, работающих при низкой температуре. В настоящее время пайка признана в качестве надежного способа соединения металлических листов, снижающего риски утечки в слоистых изделиях [24], что важно, в частности, при создании пресс-формы для литья под давлением, а также различных деталей, содержащих каналы охлаждения.

Для соединения металлических листов пайкой применяют как твердые, так и мягкие припои [6]. Пайка твердыми припоями проводится при температуре 450 °С и выше и поэтому не рекомендуется для соединения относительно легкоплавких металлов. В основном с ее помощью соединяют стальные листы. Пайка мягкими припоями (например, на основе олова и свинца) проводится по аналогии с пайкой твердыми припоями, но при температуре ниже 450 °С.

В 2016 г. J. Butt и др. (Великобритания) [25] разработали автоматизированную LOM-установку для изготовления деталей из металлических листов, соединяемых пайкой. Она устроена и работает по аналогии с упоминавшейся выше LOM-установкой, предназначенной для изготовления деталей из бумаги или пластиковой пленки. Расходный материал – листовый металл 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 предварительных экспериментах для изготовления металлических образцов использовали медную фольгу толщиной 100 мкм, которую соединяли с помощью паяльной пасты на основе серебра и олова в рабочем интервале температур 280–380 °С. Паяльную пасту наносили вручную. Стопку листов с нанесенной пастой зажимали между двумя пластинами из нержавеющей стали, снабженными болтами и гайками, и помещали в печь, где листы спаивались, образуя слоистый образец.

С целью демонстрации технических возможностей реализации сварных и паяных соединений листовых металлов при изготовлении изделий по LOM-технологии нами были проведены пробные эксперименты, в ходе которых были получены слоистые металлические образцы (рис. 1, 2).

На рис. 1 показан образец, состоящий из двух алюминиевых пластин, имеющий форму прямоугольника длиной 30 мм, шириной 25 мм и толщиной 1,5 мм. Пластины из алюминия А5 (ГОСТ 1109-01) с исходной толщиной 3 мм совмещали друг с другом и соединяли сваркой давлением методом продольной

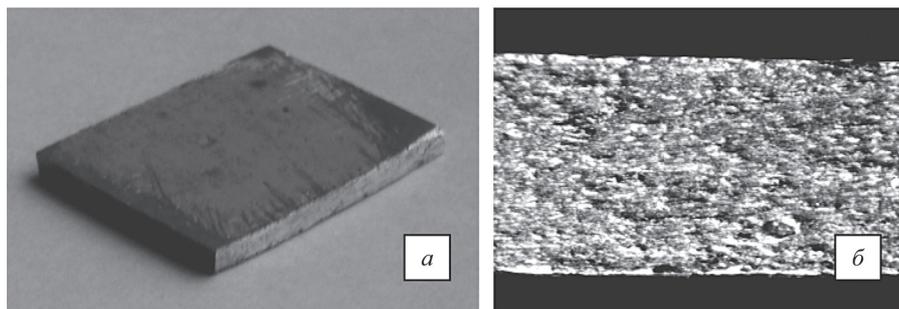


Рис. 1. Двухслойный образец из алюминиевых пластин, соединенных сваркой давлением: *а* – внешний вид; *б* – фрагмент слоистой структуры

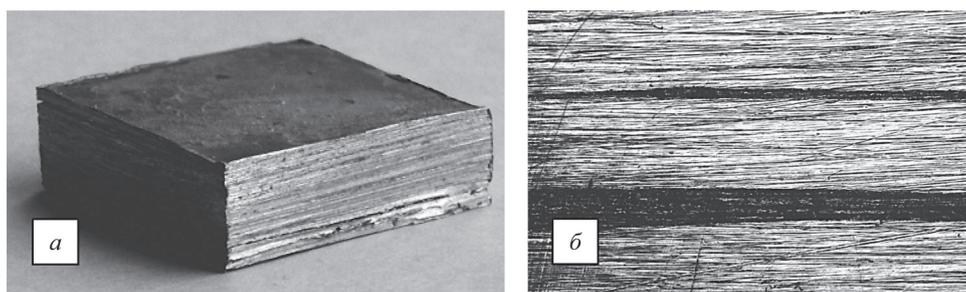


Рис. 2. Многослойный образец из латунных пластин, соединенных пайкой: *а* – внешний вид; *б* – фрагмент слоистой структуры

прокатки с усилием 300 т. Коэффициент вытяжки 4,0. Предварительно пластины подогревали до температуры 190–200 °С. На рис. 1, *а* изображена слабо заметная граница раздела пластин.

На рис. 2 показан образец, состоящий из 10 латунных пластин квадратной формы с длиной стороны 20 мм и толщиной 1 мм. Пластины из латуни Л80 (ГОСТ 931-90) предварительно покрывали слоем оловянно-свинцового припоя ПОС40 путем окунания в расплавленный припой, затем их пакетировали и соединяли пайкой. Процесс соединения проводили следующим образом: пластины, собранные в пакет, зажимали с помощью струбины и помещали в печь СНОЛ-3.5, где их выдерживали при температуре 270 °С (температура плавления припоя 238 °С), после чего охлаждали вместе с печью. На рис. 2, *а* отчетливо видны соединительные прослойки припоя.

Анализ современного состояния исследований в области ЛОМ-технологии показывает, что эта технология имеет большие потенциальные возможности для прямого изготовления металлических изделий, которые до сих пор остаются невостребованными. Для широкого распространения этой технологии необходимо, с одной стороны, проводить ее дальнейшее совершенствование, а с другой – определять виды металлических изделий, изготовление которых с ее помощью будет наиболее эффективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рифкин Дж. Третья промышленная революция: Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику, мир в целом. М.: Альпина нон-фикшн, 2014. 410 с.
2. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
3. Das S., Bourell D. L., Babu S. S. Metallic materials for 3D printing // MRS Bulletin. 2016. Vol. 41. P. 729–741.
4. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. 63с.
5. Di Matteo P. L. Method of generating and constructing three-dimensional bodies US pat. № 3932923 A. 1976.
6. Alami A. H. Using Laminated Metal Tooling (LMT) in Die Manufacturing For Clay Moulding // Proc. 5th Int. Symp. Mechatronics and its Applications (ISMA08), Amman, Jordan, May 27–29, 2008. 8 p.
7. Walczyk D. F., Dolar N. Y. Bonding Methods for Laminated Tooling // Proc. Solid Freeform Fabrication Symp. Austin, Texas, USA, 1997. P. 211–221.
8. Walczyk D. F., Harde D. E. Recent Developments in Profiled-Edge Lamination Dies for Sheet Metal Forming // Proc. Seventh Solid Freeform Fabrication Symp., Austin, Texas, USA, 1999. P. 215–226.
9. Walczyk D. F., Yoo S. Design and fabrication of a laminated thermoforming tool with enhanced features // J. Manuf. Proc., 2009. Vol.11. P. 8–18.
10. Zak G., Wang W. Adhesive Bonding of Sheet for Laminated Metal Tooling // Proc. Solid Freeform Fabrication Symp., Austin, Texas, USA, 2002. P. 502–509.
11. Емелина О. Ю. Композиционные полимерные материалы, модифицированные дисперсными наполнителями, применяемые в строительстве и при ремонте техники // Вестн. Казан. технолог. ун-та. 2014. Т. 17. Вып. 3. С. 128–130.

12. Nakagawa T. Blanking tool by stacked bainite steel plates // *Press Techn.* 1979. P. 93–101.
13. Kunieda M., Nakagawa T. Development of Laminated Drawing Dies by Laser Cutting // *Bull. JSPE.* 1984. P. 353–54.
14. Nakagawa T., Kunieda M., Liu S. Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding // *Proc 25th MTDR Conf.* 1985. P. 505–510.
15. Yi S. P. [et al]. Connect technique of laminated object manufacturing using metallic materials as modeling materials // *J. Chongqing Univ.* 2002. No 25 (2). P. 1–3.
16. Yi S. [et al]. Study of the key technologies of LOM for functional metal parts // *J. Materials Processing Technology.* 2004. Vol. 150, Is. 1–2. P. 175–181.
17. Precht M., Otto A., Geiger M. Rapid Tooling by Laminated Object Manufacturing of Metal Foil // *Adv. Mater. Res.* 2005. Vol. 6–8. P. 303–312.
18. Himmer T., Techel A., Nowotny S., Beyer E. Recent developments in metal laminated tolling by multiple laser processing // *Solid Freeform Fabrication Symp.* 2002. Proc.: August 5–7, 2002. Austin: Univ. of Texas, 2002. P. 466–473.
19. Cheng R., Wu X., Luo W. Rapid Laminated Manufacturing for Metallic Parts Based on Resistance Welding Double-station LOM // *Adv. Mat. Res.* 2013. Vol. 681. P. 298–303.
20. Obikawa T. Rapid manufacturing system by sheet steel lamination // *Proc. 14th Int. Conf. Computer Aided Production Engineering*, Tokyo, Japan, 1998. P. 265–270.
21. Obikawa T. Yoshino M., Shinozuka J. Sheet steel lamination for rapid manufacturing // *J. Mat. Proc. Tech.* 1999. Vol. 89–90. P. 171–176.
22. Bryden B. G., Pashby I. R. Sequential laminated tooling, joined by brazing, for injection molding // *Rapid Prototyping J.* 1999. Vol. 5, No. 2. P. 89–93.
23. Yoon S. H., Na S. J. Rapid laminated tooling by a brazing and soldering process // *J. Manuf. Proc.* 2003. Vol. 5, No. 2. P. 118–126.
24. Ahari H., Khajepour A., Bedi S. Laminated Injection Mould with Conformal Cooling Channels: Optimization, Fabrication and Testing // *J. Machinery Manufacturing and Automation.* 2013. Vol. 2, Iss.2, P. 16–24.
25. Butt J., Mebrahtu H., Shirvani H. Rapid prototyping by heat diffusion of metal foil and related mechanical testing // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 84. P. 2357–2366.

REFERENCES

1. Rifkin Dzh. *Tret'ya promyshlennaja revoljucija: Kak gorizont'al'nye vzaimodejstvija menjajut jenergetiku, jekonomiku i mir v celom* [The Third Industrial Revolution: How to change the horizontal interaction of energy, the economy and the world at large]. Moscow, Al'pina non-fikshin Publ., 2014. 410 p.
2. Zlenko M. A., Nagaitsev M. V., Dovbysh V. M. *Additivnye tehnologii v mashinostroenii: posobie dlya inzhenerov* [Additive technologies in mechanical engineering: a manual]. «NAMI» Publ., 2015. 220 p.
3. Das S., Bourell D. L., Babu S. S. Metallic materials for 3D printing. *MRS Bulletin.* 2016. Vol. 41. P. 729–741.
4. Valetov V. A. *Additivnye tehnologii (sostoyanie i perspektivy)* [Additive Technologies (Status and perspectives)]. SPb., University ITMO Publ., 2015. 63 p.
5. Di Matteo P. L. *Method of generating and constructing three-dimensional bodies.* US pat. № 3932923 A. 1976.
6. Alami A. H. Using Laminated Metal Tooling (LMT) in Die Manufacturing For Clay Moulding. *Proc. 5th Int. Symp. Mechatronics and its Applications (ISMA08).* Amman, Jordan, May 27–29, 2008. 8 p.
7. Walczyk D. F., Dolar N. Y. Bonding Methods for Laminated Tooling. *Proc. Solid Freeform Fabrication Symp.* Austin, Texas, USA, 1997. P. 211–221.
8. Walczyk D. F., Harde D. E. Recent Developments in Profiled-Edge Lamination Dies for Sheet Metal Forming. *Proc. Seventh Solid Freeform Fabrication Symp.*, Austin, Texas, USA, 1999. P. 215–226.
9. Walczyk D. F., Yoo S. Design and fabrication of a laminated thermoforming tool with enhanced features. *J. Manuf. Proc.*, 2009. Vol.11. P. 8–18.
10. Zak G., Wang W. Adhesive Bonding of Sheet for Laminated Metal Tooling. *Proc. Solid Freeform Fabrication Symp.*, Austin, Texas, USA, 2002. P. 502–509.
11. Emelina O. Yu. Kompozitsionnye polimehnie materialy, modifitsirovannye dispersnymi napolnitelyamy, primenyaemymy v stroitelstve i pri remonte yehniki [Composite polymeric materials modified with dispersed fillers used in construction and in the repair of machinery]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazansky Technological University*, 2014, vol. 17, vyp. 3, pp. 128–130.
12. Nakagawa T. Blanking tool by stacked bainite steel plates. *Press Techn.*, 1979. P. 93–101.
13. Kunieda M., Nakagawa T. Development of Laminated Drawing Dies by Laser Cutting. *Bull. JSPE.* 1984. P. 353–54.
14. Nakagawa T., Kunieda M., Liu S. Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding. *Proc. 25th MTDR Conf.*, 1985. P. 505–510.
15. Yi S. P. [et al]. Connect technique of laminated object manufacturing using metallic materials as modeling materials. *J. Chongqing Univ.*, 2002, no. 25 (2). P. 1–3.
16. Yi S. [et al]. Study of the key technologies of LOM for functional metal parts. *J. Materials Processing Technology*, 2004. Vol. 150, Is. 1–2. P. 175–181.
17. Precht M., Otto A., Geiger M. Rapid Tooling by Laminated Object Manufacturing of Metal Foil. *Adv. Mater. Res.*, 2005. Vol. 6–8. P. 303–312.
18. Himmer T., Techel A., Nowotny S., Beyer E. Recent developments in metal laminated tolling by multiple laser processing. *Solid Freeform Fabrication Symp.*, 2002. Proc.: August 5–7, 2002. Austin: Univ. of Texas, 2002. P. 466–473.
19. Cheng R., Wu X., Luo W. Rapid Laminated Manufacturing for Metallic Parts Based on Resistance Welding Double-station LOM. *Adv. Mat. Res.*, 2013. Vol. 681. P. 298–303.

-
20. **Obikawa T.** Rapid manufacturing system by sheet steel lamination. *Proc. 14th Int. Conf. Computer Aided Production Engineering*, Tokyo, Japan, 1998. P. 265–270.
 21. **Obikawa T., Yoshino M., Shinozuka J.** Sheet steel lamination for rapid manufacturing. *J. Mat. Proc. Tech.*, 1999. Vol. 89–90. P. 171–176.
 22. **Bryden B. G., Pashby I. R.** Sequential laminated tooling, joined by brazing, for injection molding. *J. Rapid Prototyping*. 1999. Vol. 5. No. 2. P. 89–93.
 23. **Yoon S. H., Na S. J.** Rapid laminated tooling by a brazing and soldering process. *J. Manuf. Proc.* 2003. Vol. 5, No. 2. P. 118–126.
 24. **Ahari H., Khajepour A., Bedi S.** Laminated Injection Mould with Conformal Cooling Channels: Optimization, Fabrication and Testing. *J. Machinery Manufacturing and Automation*. 2013. Vol. 2, Iss.2, P. 16–24.
 25. **Butt J., Mebrahtu H., Shirvani H.** Rapid prototyping by heat diffusion of metal foil and related mechanical testing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 84. P. 2357–2366.