



УДК 621.744.072.2

Поступила 04.12.2015

**ПРИМЕРЫ 3D-ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССАХ.
СНИЖЕНИЕ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ ОТЛИВОК****EXAMPLES OF 3D-TECHNOLOGIES IN FOUNDRY PROCESSES.
DECREASE IN METAL CONSUMPTION IN CASTINGS**

В. С. ДОРОШЕНКО, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, бульвар Вернадского, 34/1. E-mail: doro55v@gmail.com

V. S. DOROSHENKO, Physical and Technological Institute of metals and alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, 34/1, Vernadskogo ave. E-mail doro55v@gmail.com

В статье описаны конструкции металлических отливок, полученные с помощью 3D-технологий. Отмечен ряд новых способов 3D-обработки материалов, относящихся к аддитивным процессам и олицетворяющим следующий шаг к ресурсосберегающему экологическому производству. Показаны примеры моделей и отливок сложной конструкции с оптимальным сочетанием металлоемкости, прочности и привлекательного внешнего вида. Описанные высокотехнологичные 3D-процессы расширяют существующий спектр металлопродукции и возможности ее производства.

The review describes the design of metal castings produced by use of 3D-technologies. Some new ways of 3D-processing of materials connected with additive processes are described, which represents the next step in environmental resource-saving production. Examples of patterns and casting of complex design with an optimal combination of materials, durability and attractive appearance are shown. Described 3D high-tech processes are expanding the existing range of metal products and the ways of its production.

Ключевые слова. 3D-технология, снижение металлоемкости, аддитивное производство, 3D-принтер, конструирование отливок, компьютерное моделирование, литье по газифицируемым моделям.

Keywords. 3D-technology, reduction of specific consumption of metal, additive manufacturing, 3D-printer, design of castings, computer simulation, lost foam casting.

«В твердый горный камень воображение художника вкладывает живую фигуру, которую он извлекает оттуда, удаляя излишки камня», – говорил Микеланджело. Традиционное производство деталей, по сути, близко к такому валянию скульптуры. Напротив, аддитивные технологии (АТ) наращивают – печатают изделие слой за слоем. За этим процессом следит компьютер, ориентируясь на 3D-модель. У метода есть несколько сильных сторон. Во-первых, сокращаются расходы материала (в зависимости от детали экономия может достигать 75%), во-вторых, появляется возможность создавать более сложные изделия (например, с различными полостями), в-третьих, можно выпускать детали, не нуждающиеся в дополнительной обработке.

Как отметил акад. РАН Е. Н. Каблов на конференции «Аддитивные технологии в промышленности» (10.02.2015), на сегодняшний день во всех развитых странах происходит бум АТ. Мировой рынок данных технологий в 2010–2014 гг. увеличен в среднем на 27,4%, в итоге его объем достиг 3 млрд. долларов [1]. По его словам, мировыми лидерами в области АТ являются США, Германия и Китай. Кроме того, в 22 странах уже созданы национальные ассоциации по АТ, объединенные в альянс GARPA. Например, корпорация «Боинг» благодаря 3D-печати изготавливает более 22 тыс. деталей 300 наименований для 10 марок коммерческих и военных самолетов.

Сегодня можно однозначно сказать, что 3D-печать и 3D-сканирование активно входят в нашу жизнь и скоро станут действительно незаменимыми инструментами во многих сферах деятельности. И если в настоящий момент масштабы развития этого сегмента отрасли высоких технологий пока могут оценить только специалисты, то уже в ближайшем будущем ситуация будет меняться. Техника 3D-печати будет использоваться гораздо более широко и проникнет в нашу повседневную жизнь. Самой большой

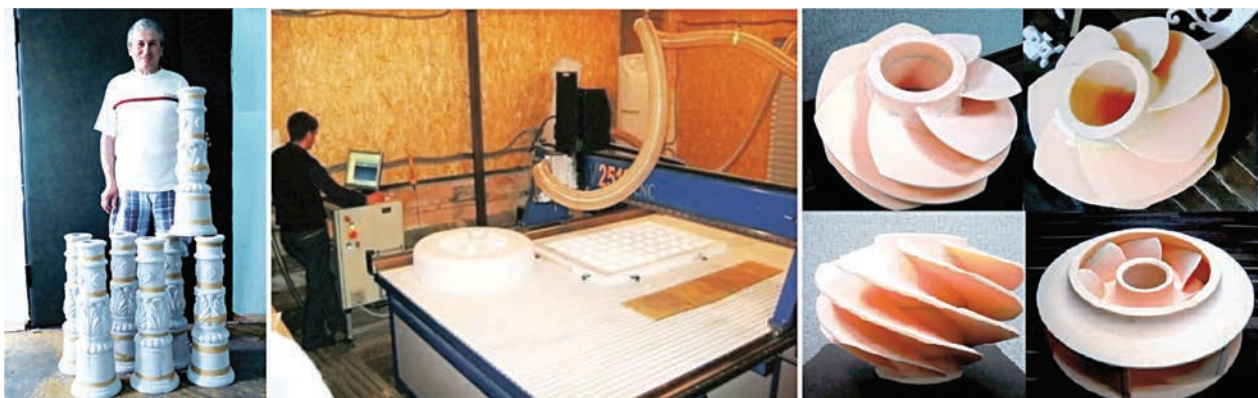


Рис. 1. Примеры изготовления моделей для ЛГМ на 3D-фрезерах



Рис. 2. Художественное литье – архитектурное украшение жилого здания: *а* – модель ворот; *б* – секции алюминиевых отливок коллажа в сборе вдоль крупного здания Нью-Йорка [4]

проблемой для АТ становится потребность изменить мышление дизайнеров, проектирующих конструкции в любой сфере деятельности человека.

В отечественном литейном производстве 3D-технологии, прежде всего, распространяются для литья по газифицируемым моделям (ЛГМ, Lost Foam Casting) при изготовлении пенопластовых моделей (технических и художественных отливок) на 3D-фрезерах [2] (рис. 1). Также для литья предложено моделирование строения простейших кристаллических решеток с использованием объемных сборных структур с повторяющимися унифицированными элементами, пенопластовые модели которых можно изготовить на пластавтоматах либо на 3D-фрезерах [3].

Пример крупногабаритных моделей для художественного литья показан на рис. 2, *а* [4], на заднем плане видны детали 3D-фрезера. По таким моделям отлит из алюминия коллаж «граффити» (рис. 2, *б*) как архитектурное украшение многоквартирного дома длиной десятки метров в элитном квартале Нью-Йорка (проект Herzog & de Meuron, 2006). Сборный коллаж вдоль лицевой стороны дома состоит из десятков отливок (включая несколько ворот), спроектированных с помощью компьютерных 3D-технологий, включая оптимизацию толщин стенок для процесса литья.

Примеры модельно-макетных изделий, выполненных аддитивным методом и показанных на прошедших в 2015 г. литейных и машиностроительных выставках Formnext и Euromold по информации из открытых источников Интернета, приведены на рис. 3.

Производство компании FIT West Corp. аддитивным методом детали cylinder head (для спортивной автомашины) массой 1,9 кг и полезной площадью 10223 см³ позволило заменить литую такую деталь массой 5,1 кг и полезной площадью 823 см³ (рис. 4) [5].

Сайты по литейному производству подробно описывают и иллюстрируют аддитивные технологии. В статье Роберта Брукса [6] описан устойчивый прогресс аддитивных методов, бросающих вызов тради-

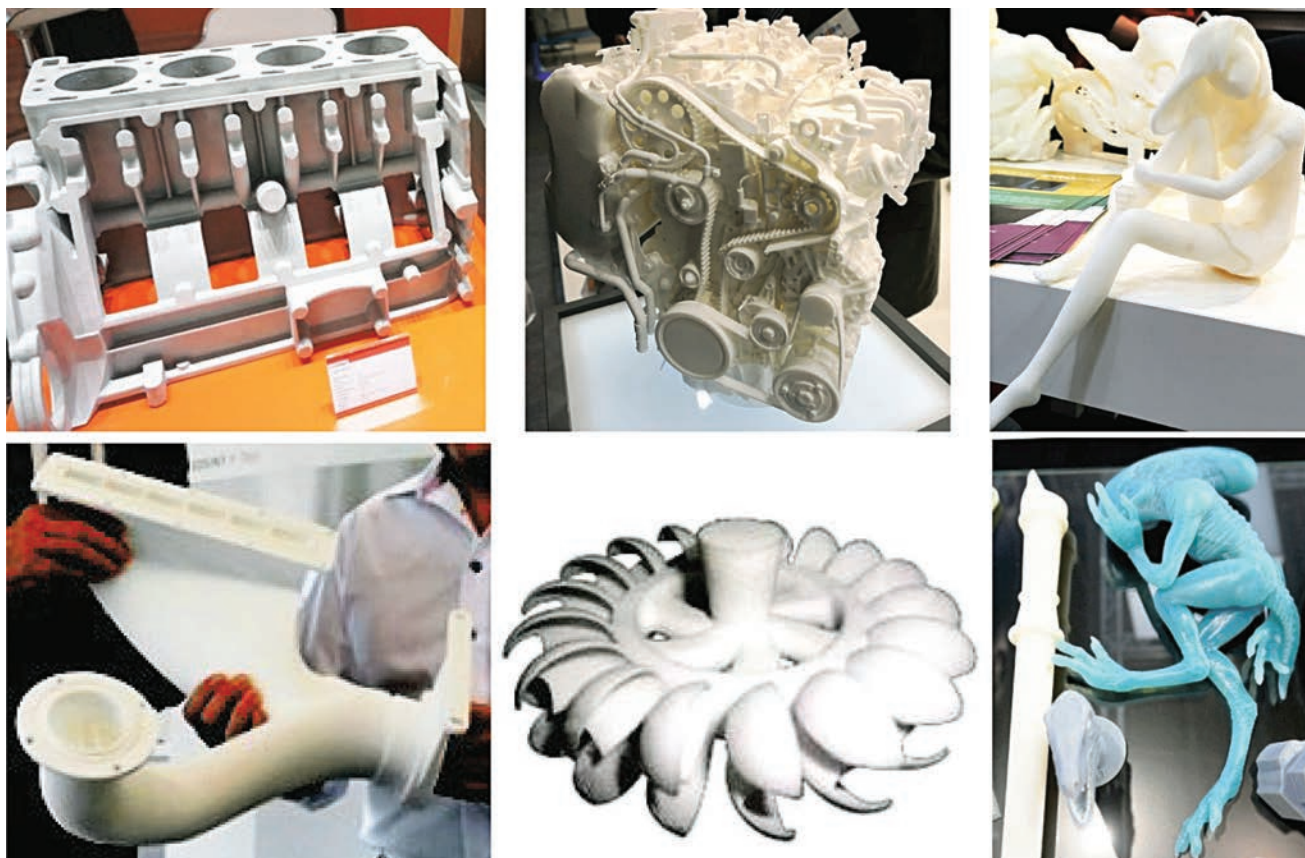


Рис. 3. Примеры модельно-макетных изделий аддитивного производства

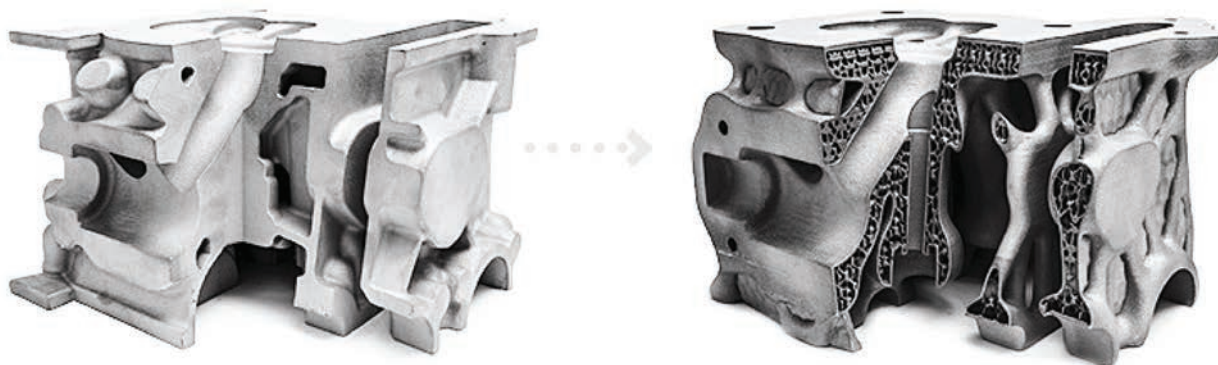


Рис. 4. Перевод литой детали для автоспорта на аддитивное производство [5]

ционными способам конструирования и изготовления деталей литейным процессом. Одна из причин этого – широкая доступность метода АТ сделала возможным для десятков научно-технических центров в различных странах целенаправленно заниматься исследованиями, решая конкретные проблемы и постепенно улучшая общие перспективы. 3D-печать является доступной для различных способов производства (лазерного спекания, стереолитографии и т. д.), которые передают информацию от CAD в структурной форме, ограничения определяются только физической природой изготавливаемой конструкции или применимостью выбранной системы производства.

Например, научно-исследовательский центр VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. и Nurmi Cylinders Oy разработали для 3D-печати гидравлический клапан, который, по их утверждению, является экономически эффективным для производства, надежен в исполнении и на 66% легче, чем оригинальная деталь. Для изготовления таких деталей обычно прибегают к сверлению. Клапан используется для контроля жидкости в гидравлических системах управления движением тяжелой техники, например, подъемных кранов (рис. 5, а) [6].

3D-печать позволила оптимизировать внутренние каналы для достижения наилучшего потока гидравлической жидкости без уменьшения ее требуемого объема и заменила выполнение такого объема

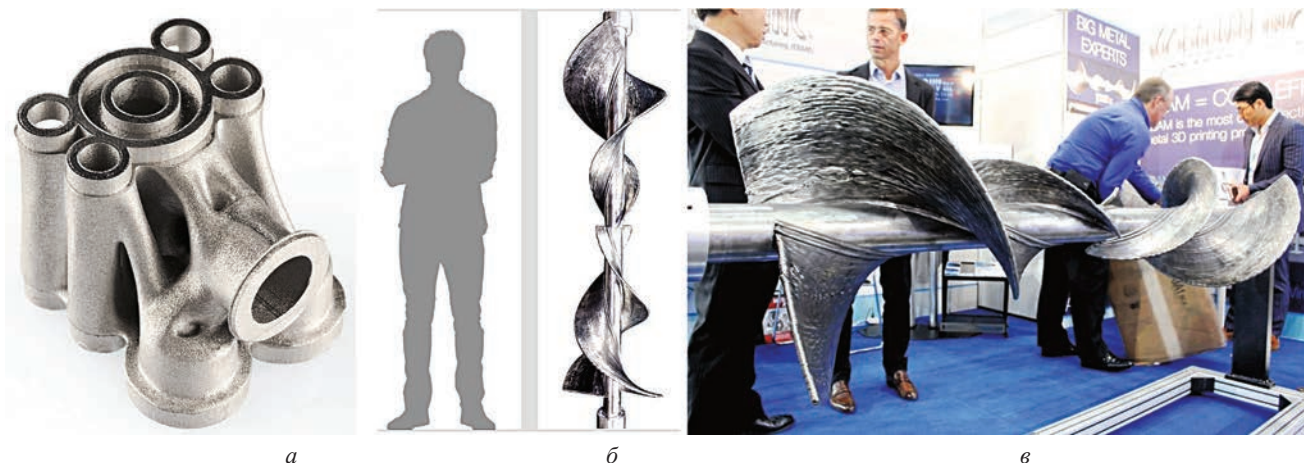


Рис. 5. Примеры АТ с применением металла: а – клапан гидравлической системы; б, в – шнек

каналов сверлением, повысив уровень герметичности с предотвращением утечки рабочей жидкости под высоким давлением. Блок гидравлического клапана является хоть и небольшой, но важной деталью. По результатам исследования, VTT инициировал двухлетнее государственно-частное финансирование в размере \$3,5 млн. для создания в Финляндии новых предприятий, использующих АТ.

Компания Sciaky Inc. (Чикаго, США) быстро расширяет размерные возможности своего процесса «электронно-лучевой» АТ (ЕВАМ), который она называет «наиболее широко масштабным» 3D-методом печати металлом с возможностью распространения на производство деталей с габаритами от 0,2 до 5,8 м (8 in. to 19 ft.). На рис. 5, б, в показаны сравнение такой детали «шнек» с ростом человека, а также ее демонстрация на выставке. Также сообщено, что ЕВАМ является самым быстрым процессом осаждения металла из доступных со скоростью осаждения от 3,18 до 9,07 кг/ч. Кроме того, установка для печати имеет систему двойной подачи проволоки для объединения двух металлических сплавов. Титан, тантал, ниобий, вольфрам, молибден, алюминий, нержавеющая сталь, никелевые сплавы и другие возможно поместить в одну ванну расплава или материалы могут по заданию разделять в разные части единой структуры [6].

Разработчики-металлисты для 3D-печати не всегда привлекают лазеры. NanoSteel Co. Inc., которая сосредоточена на АТ с производством своих присадок на «наноструктурированных» содержащих сталь материалах, представила два порошковых сплава для струйного связывания. Для такого процесса АТ материал осаждают в последовательных слоях, связанных друг с другом эпоксидным связующим, до операции печатания, когда эти слои нагревают и сплавляют в единую структуру. Разработчик считает, что такой процесс АТ обладает более высокой скоростью, чем основанный на лазерных методах спекания. Новые материалы NanoSteel (BLDRmetal™ J-10 и J-11) предложены как компоненты для печатания стойких к абразивному износу изделий, которые обладают преимуществом при создании требуемых сложных конструкций без оснастки (рис. 6, а). Разработчиком рекомендовано, что компоненты с использованием J-10 имеют превышение по функции удлинения в 2 раза и по износу – в 3 раза, чем нержавеющая сталь марки 420 [6].

NanoSteel продемонстрировала материалы в проектах с 3DX Industries – поставщиком услуг АТ путем печатания безопасных инструментов для авиационной компании, которая удаляла панели самолетов. Инструменты, изготовленные с J-10, служили в 5 раз дольше, чем в предыдущих версиях, значительно уменьшая риск задержек в обслуживании самолетов. По словам Роджера Янссена, президента 3DX, «Решение NanoSteel позволило нам создать долговечные и надежные инструменты, которые поставляются заказчику для выполнения работ по быстрому требованию» [6].

Оба материала основаны на сочетании сложных металлических фаз, которые обеспечивают износостойкость и при наличии стальной матрицы – пластичность и ударную вязкость. Материал марки J-11 предназначен для применения в условиях экстремального износа. Компоненты, образующиеся в J-11, повышают износостойкость в 10 раз по сравнению с изделиями из нержавеющей стали марки 420 соответственно разработчику. Порошки BLDRmetal предлагают заманчивые альтернативы существующим материалам для струйной печати. Они повышают возможности печати с помощью смешанных материалов со связующим, обеспечивая печать с присадками высокой сложности и более дешевыми компонентами высокой износостойкости [6].

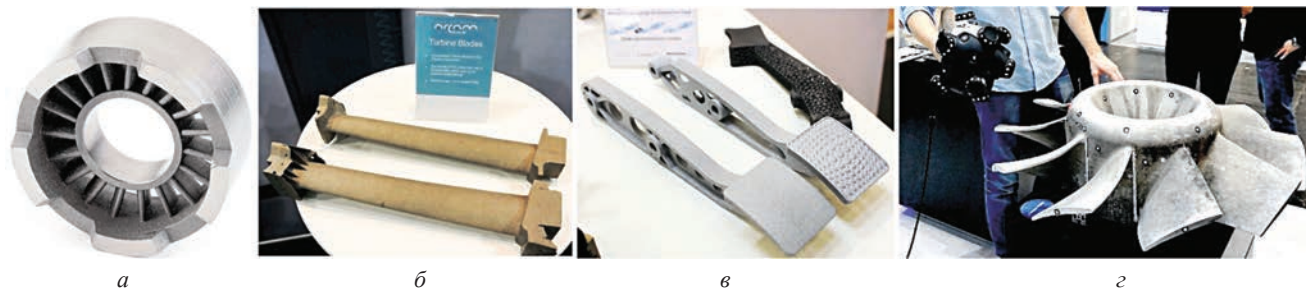


Рис. 6. Примеры 3D-технологии для производства металлоизделий (из Интернет-репортажей о выставках Euromold-2015 и Formnext-2015): *а* – деталь бурового насоса для нефти и газа, полученная из материала J-10 [6]; *б* – лопатки турбины; *в* – педали; *г* – процесс 3D-сканирования поверхности отливки турбины



Рис. 7. Некоторые примеры использования 3D-технологии концерном BMW: *а* – деталь насоса; *б*, *в* – эргономичный инструмент (белого цвета) на руке работника

Современные предприятия, используя АТ и считая их одним из ключевых видов производства будущего, часто указывают это в своих пресс-релизах для подтверждения инновационного уровня своего производства. Так, в ноябре 2015 г. концерн BMW отмечал 25-летие внедрения АТ на своем производстве [7]. Кроме изготовления эргономичных инструментов, деталей концептуальных, эксклюзивных или ретро-автомобилей, BMW с апреля 2015 г. оснастила свои гоночные автомобили DTM водяным насосом с рабочим колесом, изготовленным 3D-печатью (рис. 7, *а*). Все без исключения насосы работают безупречно, подтверждая ведущую роль BMW в использовании АТ. Высокоточная деталь состоит из алюминиевого сплава, подвергается большим напряжениям и показала высокую надежность в жестких условиях автоспорта.

В середине 2014 г. BMW Group представила 3D-печатный эргономичный инструмент для конвейерной сборки, защищающий работников от избыточных напряжений на суставы большого пальца при проведении определенных операций по сборке. Каждый из этих гибких монтажных устройств соответствует форме и размерам рук конкретного работника (рис. 7, *б*, *в*). Команда Центра Rapid Technologies в Центре BMW Group в области исследований и инноваций (FIZ) в Мюнхене обрабатывает около 25 000 запросов по вопросам АТ в год, производя около 100 000 деталей в год для собственных заказчиков. В зависимости от функции и размера детали могут быть доступны в течение всего нескольких дней.

Таким образом, в продолжение цикла работ [2, 8–10] о развитии 3D-технологий литейного производства и снижения металлоемкости отливок выполнен краткий обзор некоторых последних инноваций по этой теме. АТ олицетворяют со следующей промышленной революцией, ведущей к ресурсосберегающему экологическому производству. Показаны примеры моделей и отливок сложной конструкции с оптимальным сочетанием материалоемкости, прочности и привлекательного внешнего вида. Описанные высокотехнологичные 3D-процессы расширяют существующий спектр металлопродукции и возможность ее изготовления, как правило, в условиях, значительно превышающих по экологической безопасности и длительности выполнения традиционные условия литейного цеха.

Литература

1. Новости ВИАМ. URL: <http://viam.ru/news/2050> (дата обращения: 1.12.2015).
2. Шинский И. О., Дорошенко В. С. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям // Металл и литье Украины. 2009. № 4–5. С. 30–33.

3. Д о р о ш е н к о В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям // Литейное производство. 2008. № 9. С. 28–32.
4. Г о р б у н о в А. В. Эволюция литья: прошлое и будущее // Оборудование, разработки, технологии. 2014. № 10–12. С. 46–49.
5. Сайт компании FIT West Corp. – URL: <http://www.netfabb.com/additivedesignandmanufacturing.php> (дата обращения: 1.12.2015).
6. B r o o k s R. Breaking Barriers in Shape, Space, Material to Achieve Finished Parts. // Foundry Management & Technology. 13.10.2015. – URL: <http://foundrymag.com/materials/>
7. 25 years of 3D printing at the BMW Group: Pioneers in Additive Manufacturing Methods. Press release BMW Group // Manufacturing Engineering, 2.12.2015 / <http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=8589937322> (дата обращения: 2.12.2015).
8. Д о р о ш е н к о В. С. 3D-технологии для формовки и литья // Литье и металлургия. 2015. № 3. С. 30–39.
9. Д о р о ш е н к о В. С., Ш и н с к и й В. О. Моделирование отливок как оболочковых конструкций с целью металлосбережения // Металл и литье Украины. 2015. № 6. С. 30–34.
10. Д о р о ш е н к о В. С. Анализ и идентификация литых легковесных металлоконструкций с использованием теории минимальных поверхностей // Металл и литье Украины. 2015. № 11. С. 24–28.

References

1. Novosti VIAM. URL: <http://viam.ru/news/2050> (дата обращения: 1.12.2015).
2. S h i n s k i j I. O., D o r o s h e n k o V. S. 3D-tehnologii pri lit'e po gazificiruemym modeljam [3D technology in the lost foam casting]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2009, no. 4–5, pp. 30–33.
3. Д о р о ш е н к о В. С. Sposoby poluchenija karkasnyh i jacheistyh lityh materialov i detalej po gazificiruemym modeljam [Methods for the preparation of porous frame and cast materials and components for the gas models]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2008, no. 9, pp. 28–32.
4. Г о р б у н о в А. В. Jevojucija lit'ja: proshloe i budushhee [Evolution casting: past and future]. *Oborudovanie, razrabotki, tehnologii = Equipment, development, technology*, 2014, no. 10–12, pp. 46–49.
5. FIT West Corp. URL: <http://www.netfabb.com/additivedesignandmanufacturing.php>
6. B r o o k s R. Breaking Barriers in Shape, Space, Material to Achieve Finished Parts. // Foundry Management & Technology. 13.10.2015. URL: <http://foundrymag.com/materials/>
7. 25 years of 3D printing at the BMW Group: Pioneers in Additive Manufacturing Methods. Press release BMW Group // Manufacturing Engineering, 2.12.2015 / <http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=8589937322>.
8. Д о р о ш е н к о В. С. 3D-tehnologii dlja formovki i lit'ja [3D-technologies for molding and casting]. *Lit'e i metallurgija = Foundry Production and Metallurgy*, 2015, no. 3, pp. 30–39.
9. D o r o s h e n k o V. S., S h i n s k i j V. O. Modelirovanie otlivok kak obolochkovykh konstrukcij s cel'ju metallosberezhenija [Simulation of casting as a shell structures to saving of Metal]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2015, no. 6, pp. 30–34.
10. D o r o s h e n k o V. S. Analiz i identifikacija lityh legkovesnyh metallokonstrukcij s ispol'zovaniem teorii minimal'nyh poverhnostej [Analysis and identification of the cast lightweight metal structures using the theory of minimal surfaces]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2015, no. 11, pp. 24–28.