



УДК 621.744.072.2

Поступила 03.06.2015

3D-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ФОРМОВКИ И ЛИТЬЯ 3D-TECHNOLOGIES IN FORMING AND FOUNDRY

*В. С. ДОРОШЕНКО, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,
г. Киев, Украина*

*V. S. DOROSHENKO, Physical and Technological Institute of metals and alloys of National Academy
of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

В статье показаны металлические отливки, полученные с помощью 3D-технологий. Способы 3D-обработки материалов относятся к аддитивному методу производства, отличающемуся ресурсосбережением. Каркасно-ячеистые отливки могут наследовать структуры природы с оптимальным сочетанием материалоемкости, прочности и привлекательного внешнего вида. 3D-технологии расширяют существующий спектр металлопродукции. Среди новых литейных процессов в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины запатентованы 3D-технологии формовки песчаных изделий путем деформирования из сыпучих материалов, а также получения литейных оболочковых форм по разовым моделям.

This review describes metal castings produced using 3D technology. Methods for 3D processing of materials related to the additive method of production, characterized by resource conservation. Frame-cellular casting can inherit the structure of nature with the best combination of materials, durability and attractive appearance. 3D technologies expand the existing range of metal products. Among the new foundry processes at the Institute PTIMA of NAS of Ukraine patented 3D technology of molding sand products through the deformation of granular materials, as well as getting sand shell molds for one-time pattern.

Ключевые слова. 3D-технология, конструирование отливок, компьютерное моделирование, ячеистые отливки, 3D-принтер, аддитивное производство, Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины.

Keywords. 3D-technology, engineering of castings, computer modeling, cellular casting, 3D-printer additive manufacturing, Physical and Technological Institute of metals and alloys of National Academy of Sciences of Ukraine.

Применение в промышленности 3D-печати связывают с третьей промышленной революцией, которая будет отличаться обширным освоением аддитивного производства [1]. Последний термин упоминается в качестве синонима 3D-печати. Применение 3D-принтеров прежде всего позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду, экономить до 90% исходного материала в отличие от текущего «субтрактивного производства» [2], которое предполагает разрезание материалов на части, подбор подходящих элементов и их соединение, на чем зиждется нынешнее традиционное производство. Если сегодня принцип производства деталей состоит преимущественно в удалении с заготовки «лишнего» материала, то аддитивное производство («add» – «добавлять») использует другой принцип создания объектов – послойный. 3D-принтеры выращивают объект с нуля, добавляя к нему мелкие порции материала, формирующие слои, поэтому этот процесс и называется аддитивным.

Начавшаяся третья промышленная революция приведет к будущему мировому падению спроса на черные металлы, оставляя лишь конкурентные ресурсосберегающие и экологически безопасные производства [2]. Основы новой индустриальной парадигмы, включающей аддитивное производство, будут созданы в следующие 20 лет в рамках текущей индустриальной модели [2]. По мере распространения новой технологии 3D-печать индивидуализированных промышленных продуктов на месте их использования сократит издержки логистики и потребление энергии [1]. Недавно NASA напечатало из металла методом лазерного спекания ракетный инжектор, причем теперь он состоит из двух деталей, а не из 164 (!) как ранее. Уже печатают оружие из металла.

Преимущества 3D-принтера доказаны даже на борту Международной космической станции. Когда в НАСА по электронной почте «отправили» торцевой гаечный ключ космонавту Барри Вилмору, ключ из

пластика был автоматически отпечатан в космосе. Без 3D-принтера космонавтам приходилось ждать несколько месяцев, пока придет следующий трансфер с новыми деталями [3].

Авиастроение, пожалуй, является лидером 3D-печатания. Больше тысячи деталей для новых аэробусов A350 XWB будет изготавливаться Компанией Stratasys – производителем деталей для самолетов на принтерах с 3D-печатью. 3D-печать позволит уменьшить массу авиалайнера Airbus A350 XWB. Также создание деталей для самолета с помощью 3D-принтера дает возможность значительным образом экономить материалы и соблюсти жесткие сроки поставок самолетов по заключенным контрактам [4].

Информация о выставке EuroMold 2014

Сегодня все чаще рассылки новостей с выставок, литейных и машиностроительных журналов и сайтов содержат информацию о 3D-технологиях для литейных процессов. В частности, во Франкфурте в конце ноября 2014 г. прошла промышленная выставка EuroMold 2014 – одно из крупнейших в мире ежегодных событий, представляющих современные производственные технологии, как традиционные, так и аддитивные – 3D-печати [5]. На выставке были представлены оборудование и инструменты для отливки и штамповки деталей, металлообработки; CAD/CAM/CAE/PDM-решения; устройства для быстрого прототипирования и аддитивного производства. С каждым годом павильон 3D-печати на выставке приближается к размерам основного павильона «MoldMaking/Tooling», что служит показателем востребованности и быстрого развития аддитивных технологий, объединяя запросы представителей автомобильной, машиностроительной, электронной, медицинской, аэрокосмической и других отраслей промышленности.

Наибольший интерес вызвал стенд *3D-Systems* (США). Эта компания была основана в 1986 г. Charles W. Hull для промышленного продвижения своего изобретения – метода и аппарата для стереолитографии (Stereolithography, SLA – аддитивное производство моделей, прототипов и готовых изделий из жидких фотополимеров). Сегодня *3D-Systems* является одним из мировых лидеров среди разработчиков и поставщиков технологий аддитивного производства. На EuroMold 2014 компания привезла более десятка устройств, создающих изделия из полимеров и металлов. Например, ProX 400 – для работы с металлами и сплавами (включая сталь, алюминий, титан, кобальт-хромовый сплав), который позволяет изготавливать значительные по размерам детали: область литья достигает 500×500×500 мм.

Еще один лидер на рынке 3D-принтеров, компания *EOS*, которая привезла на EuroMold промышленную установку EOS M400 для широкого спектра металлов и сплавов (область построения – 400×400×400 мм). Принтер работает на основе технологии DMLS (Direct Metal Laser Sintering, прямое лазерное спекание металлов), разработанной *EOS*. Продукт совместного проекта *EOS* и компании *Cooksongold* (ведущий мировой поставщик драгоценных металлов для ювелирных изделий и часов) представлен DMLS-принтером Precious M080. Cooksongold разработала порошки из золота 750 пробы, которые применяются в Precious M080 для создания сложных, детализированных ювелирных изделий.

Участники EuroMold стремились максимально наглядно показать, как аддитивные технологии применяются в автомобильном производстве, авиакосмической, оборонной промышленности, производстве товаров широкого потребления, медицине, архитектуре. Компания *Stratasys* представила на выставке Objet1000 крупнейшую в мире производственную систему трехмерной печати с использованием нескольких материалов для быстрого создания моделей промышленного размера и прототипов в масштабе 1:1 (область построения – 1000×800×500 мм). Рядом располагался StreetScooter – электромобиль, экстерьер и интерьер которого полностью напечатаны на этом 3D-принтере.

Одна из самых быстрорастущих компаний на рынке аддитивных технологий – компания *Arcam AB* (Швеция), решения которой ориентированы на аэрокосмический и медицинский секторы, показала установки *Arcam*, работающие по технологии EBM (Electron beam melting, электронно-лучевая плавка) для получения высокоточных изделий из титана. На стенде *Arcam* были продемонстрированы, как 3D-принтеры позволяют решать такие проблемы, как уменьшение массы конструктивных элементов ракеты или создание индивидуальных (под конкретного человека) ортопедических протезов.

Хотя самым популярным материалом для печати на сегодня остаются полиамиды, на EuroMold 2014 отмечено значительное увеличение числа принтеров для металлов. Кроме перечисленных, они были представлены также такими компаниями, как Renishaw, Solid Concepts, Realizer, SLM, Additive Industries, Concept Laser Arburg. Еще один тренд – стремление к полной автоматизации 3D-принтеров, т. е. сведение к минимуму процессов с участием человека (новые загрузки, очистка моделей и т. д.) – необходимость, вызванная запросами заказчиков на создание систем для серийного производства.

Обзор информации о 3D-процессах в литейном производстве

В отечественных цехах эти технологии нашли распространение для литья по газифицируемым моделям (ЛГМ, Lost Foam Casting) при изготовлении пенопластовых моделей на 3D-фрезерах по компьютерным программам [6], включая моделирование решетчатых отливок с использованием объемных сборных структур с повторяющимися унифицированными элементами, пенопластовые модели которых можно изготовить на пластавтоматах либо на 3D-фрезерах [7].

Ряд зарубежных фирм предлагает 3D-печата́ние песчаных форм и стержней без какой-либо формообразующей оснастки непосредственно из принтера. От цифрового файла металлических деталей, например, полученного по электронной почте в течение семи часов, можно получить готовую отливку [8]. 3D-принтеры могут изготовить, в частности, воскоподобные модели быстрее, чем многие другие процессы, например, модель ротора в течение нескольких часов. Кроме того, на том же принтере можно изготавливать литейные песчаные формы путем замены материалов и программы. Материалы формы мало чем отличаются от традиционных песчаных смесей. На рис. 1 показаны этапы технологического процесса: от изображения детали на мониторе компьютера до отпечатанной на принтере песчаной формы и готовой отливки [8].

На рис. 2 показан процесс изготовления песчаной формы. В «картридж» с надписью – названием компании подается песчаная смесь, послойно наносится на подложку на подвижном конвейере по всей горизонтальной плоскости формы и избирательно отверждается с помощью устройства на «картридже» [8], остатки сыпучей смеси осыпаются с отвержденной формы.

Процессы 3D-печати металлоизделий возникли при интеграции знаний из мира компьютеров, механики и материаловедения. Разработка большинства из них началась в середине 90-х годов. Хотя они развивались разными институтами, но их элементарные принципы практически одинаковы [9] и показаны на рис. 3. При движении сопла 2 в направлении 1 пучок лучей лазера 3 плавит частицы порошка 5 в зоне 6, в результате чего получают осажденный слой 4 на подложке 7. Поскольку детали получают из жидкого металла путем расплавления его и послойного нанесения на подложку, где он затвердевает, то деталь имеет все признаки отливки. При этом металл плавят не в печи, а на подложке (реже в потоке теплоносителя) с затвердеванием и охлаждением его, как правило, в защитной газовой среде при наличии большинства явлений и операций, присущих литейно-металлургическим процессам.

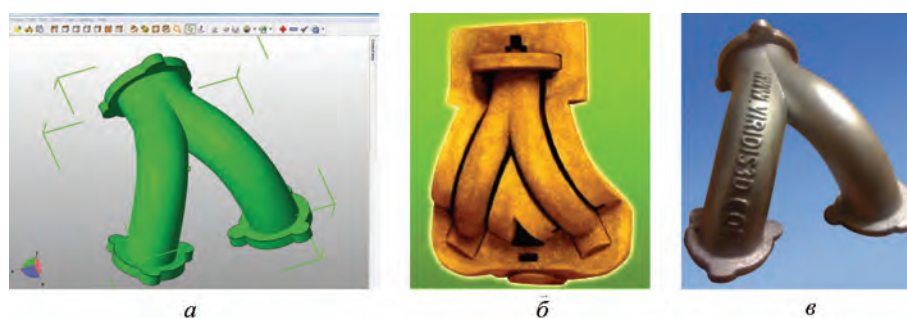


Рис. 1. Технологический маршрут: от файла детали на мониторе компьютера (а) до отпечатанной на принтере песчаной формы (б) и готовой отливки (в) [8]

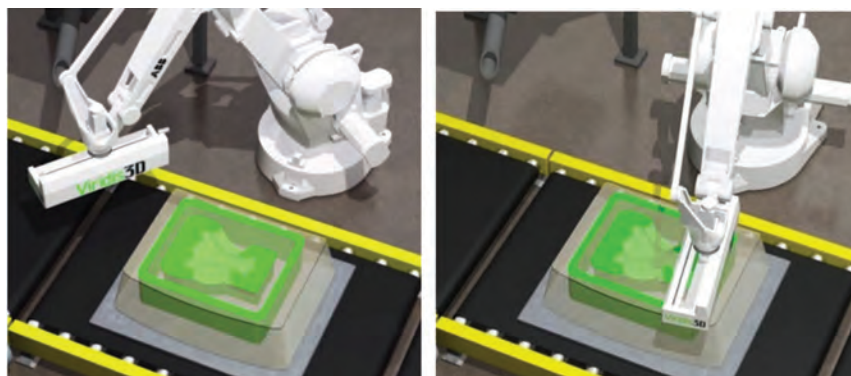


Рис. 2. Две позиции манипулятора в процессе печатания песчаной формы [8]



Рис. 3. Способ 3D-печати металлоизделий: *а* – принципиальная схема [9] (1 – направление движения; 2 – сопло осадителя; 3 – пучок лучей лазера; 4 – осажденный слой; 5 – частицы порошка; 6 – зона расплава; 7 – подложка); *б* – примеры выполнения

Полученные таким образом детали в статических условиях имеют механические свойства не хуже, чем кузнечно-прессовые заготовки. Но из-за продолжительного времени получения могут иметь неравномерную макроструктуру, которая может привести к усталостным трещинам.

В настоящее время стоимость установок для 3D-печати металлоизделий, работающих по компьютерным программам с моделированием фазового перехода металла, созданием защитной атмосферы, режимов перемещения, контроля размеров заготовки и т. п. функциями, часто достигает миллионов долларов США, и пока использование их для отечественного машиностроения проблематично.

Однако в настоящей работе предлагается рассмотреть внешний вид конструкций полученных отливок, галерея которых постоянно пополняется из открытых источников Интернета, новостных рассылок технических журналов и выставок. С позиций нынешних традиционных литейных процессов большинство таких металлоотливок представляют «шедевры» литейного мастерства. Литейщики и конструкторы, имея сведения о таких новых конструкциях, оптимизированных компьютером и получаемых при его управлении, будут знать, с чем им предстоит конкурировать. Многие конструкции 3D-отливок, получаемых без формообразующей оснастки, уклонов и прибылей с минимальными припусками, оптимизированы компьютерными программами для поиска конфигурации с минимальной массой, энергией (или в целом стоимостью) при выполнении требований служебного назначения.



Рис. 4. Варианты 3D-печати различных кронштейнов

На рис. 4 показаны примеры различных деталей типа кронштейнов, большинство из которых монтируют в подвижных конструкциях. Причем первые четыре детали верхнего ряда представляют варианты одной детали, две из которых с удаляемыми вставками, используемыми как подложки для нанесения потолочных стенок этих деталей, далее на трех деталях (по диагонали) видно, как традиционная монолитная конструкция «превращается» в изящные каркасно-ячеистые версии.

Во многих случаях сочетание предельных возможностей процесса литья и оптимизации конструкций отливок с точки зрения ресурсосбережения приводит к тому, что эти конструкции становятся подобными наблюдаем в живой и неживой природе, включая модели строения структур органических и неорганических веществ. Очевидно, предлагаемые компьютером «решения» во многом приближаются к созданным природой конструкциям, отличающимся высокой энергоэффективностью [10], включая наличие таких характерных свойств, как повторяемость в различных направлениях одинаковых элементов, комбинаторность (фрактальность) и ячеистость.

Имеется значительное количество примеров 3D-печати лопастных деталей, показанных на рис. 5 и часто требующих высокой точности при изготовлении сложной гравюры лопасти. Первым на рисунке показан реактивный двигатель, отпечатанный в Австралии. Формообразующая металлическая оснастка для традиционных способов литья часто по стоимости превышает стоимость разовой 3D-печати таких отливок.

Применение в технических устройствах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы изучается бионикой. Однако в основу конструирования, т. е. создания прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта, могут быть положены не только образы живой и неживой



Рис. 5. Примеры лопастных деталей

природы, но и воображаемые, идеальные (например, математические) модели, в общем случае не обязательно имеющие или на сегодня обнаруженные соответствия чему-либо в физическом мире [10].

Продолжают перечень примеров конструкции 3D-литых каркасно-ячеистых изделий детали на рис. 6, часть из которых имеет декоративное назначение. Оптимизация их строения привела к тому, что они во многом напоминают «технические решения», заимствованные у природы, поскольку природой «уже решены вопросы» покорения пространства конструкциями с высокой эффективностью и ресурсосбережением, а органические ячеистые или «фрактального» вида конструкции отобраны длительной эволюцией. Теперь конструктор выполняет «эволюцию изделия» прямо на своем компьютере.

Стираются грани между научным и техническим уровнем познания в отражение идей, вероятно, еще отца кибернетики Н. Винера из его книги «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» (1948). Сегодня компьютерное моделирование помогает не только отразить наши представления об устройстве окружающего мира, но и заимствовать из него некоторые детали для собственных рукотворных конструкций. Когда мы говорим о строении вещества, то имеем в виду, что основу наших знаний в химии, физике, материаловедении, в большинстве областей наук о Земле составляют, прежде всего, знания о структуре вещества, которая во многом определяет его свойства. Поэтому ученые ставят задачу научиться открывать новые материалы путем расчета их структур на компьютере [11], а конструкторы – тем же путем проектировать металлоконструкции, в частности, для машиностроения [10].

Устойчивая кристаллическая структура характеризуется наиболее низкой энергией. Ученые указанную задачу решают путем исследования всех возможных взаимных положений атомов, рассчитывая энергию для каждого из них и так определяя самую низкую энергию и оптимальную структуру. Эта задача напрямую не решается, но можно ее решить, не прибегая к полному перебору, а направляя расчет с помощью самообучения к «глобальному минимуму» энергии. В этом ключе разработан подход, основанный на идеях эволюции, представляющий собой многомерную минимизацию для поиска любых тер-



Рис. 6. Каркасно-ячеистые металлоизделия

модинамически устойчивых состояний [11]. Создание методов анализа этих данных привело кристаллографов в область многомерной геометрии.

Если созданы программы проектирования структур новых материалов из атомов, то, копируя атомные решетки аналогично примерам в [7], можно получать их макроразмерные аналоги в виде решетчатых пространственных отливок 3D-методами в развитие способов литья ячеистых металлоизделий. Расширяя гамму конструкций таких отливок, литейщики развивают новое направление литья сотовых, объемно-ячеистых, скелетно-решетчатых металлоизделий, которые имеют потенциал для применения как облегченные несущие, армирующие, изолирующие, ограждающие, демпфирующие нагрузки пространственные конструкции, включая способных поглощать или пропускать через свои соты поток вещества или энергии.

Примеры 3D-отливок столь многочисленны в свободном доступе на Интернет-сайтах, что показать их в одной статье нет возможности. Для дополнения обзора на рис. 7 показаны примеры, не вошедшие в предыдущие группы, начиная слева направо с художественной отливки, детали стрелкового оружия и ряда корпусных деталей. В зарубежной технической информации также описаны отливки сопел специального назначения, теплообменников, показано множество ювелирных отливок, образцов бижутерии, декоративно-художественных изделий, деталей протезов, включая челюстно-зубные, и др.

Рассмотренные конструкции расширяют наши представления о возможностях литья. Ряд образцов на выставках даны в виде примеров перевода получаемых в песчаных формах серийных отливок на 3D-литье при «превращении» традиционных монолитных конструкций в изящные каркасно-ячеистые как наглядные примеры металлосбережения и улучшения внешнего вида. Отмечается экологический аспект и высокий уровень охраны (культуры) труда такого производства отливки в автоматическом режиме в закрытом объеме камеры 3D-принтера. Отсутствие литейных форм и стержней лишает производственный процесс выделения вредных веществ, характерных для литейных цехов.



Многие примеры на рис. 6 выглядят весьма фантастично для сегодняшнего производства, хотя отечественными учеными уже описаны и запатентованы ряд ячеисто-каркасных отливок и оригинальные способы их литья и моделирования [7, 10]. Ячеистые металлосберегающие отливки могут наследовать структуры природы, создаваться воображением человека, компьютерным проектированием по математическим формулам, визуальным изображением или чертежом на мониторе компьютера, по поставленным программой требованиям или задаваться другими условиями, например, включая метод «дополненной реальности» (augmented reality). Последний термин в отечественной патентной литературе определен в работе [12]. Закладывая в компьютер программы, например, аналогов известных конструкций из мира природы (как библиотеку аналитических моделей, галерею изображений и т. п.), можно развивать технические системы по ее законам. Эти законы можно познать и использовать для сознательного – без множества «пустых» проб – решения конструкторских задач, включая конструирование отливок, превращая создание новых технических конструкций в точную науку.

Когда мы видим в фантастических фильмах роботов-трансформеров или андроидов, космические корабли и станции, машины и оружие, во-первых, инженерным взглядом можем заметить, как много в этих конструкциях отливок, а, во-вторых, можем сказать, что уже сегодня многие из таких отливок доступны для производства современными литейными процессами, включая 3D-технологии, которые значительно расширяют существующий спектр производимой металлопродукции.

Отметим также, что среди новых литейных процессов в ИФТИМС НАН Украины запатентованы технологии 3D-деформирования изделий из сыпучих материалов [13, 14], а также способ 3D-формовки



Рис. 7. 3D-металлоизделия разнопланового назначения

песчаных изделий при получении многослойных оболочковых литейных форм, включая формовку по разовым моделям [15, 16]. Эти работы ведутся под научным руководством проф. О. И. Шинского по теме «Разработка научных и технологических основ по созданию литых конструкций из железоуглеродистых и цветных сплавов, оптимальных процессов их получения и автоматизированных методов проектирования».

Выводы

Обзор процесса формовки и конструкций металлических отливок – примеров 3D-технологий иллюстрирует развитие аддитивного метода производства. Такие технологии связывают с третьей промышленной революцией, ведущей к ресурсосберегающему экологическому производству, технологический виток которой порой опережает этапы осмысления научно-практических и научно-исследовательских решений. Описанные возможности 3D-процессов расширяют спектр металлоконструкций, а показанные каркасно-ячеистые отливки часто наследуют структуры природы с оптимальным сочетанием материалоемкости, прочности и привлекательного внешнего вида. Технологии, открываясь миру науки, используют научные методики и багаж знаний как основу технологического развития, а также одновременно используют инструментарий компьютерного моделирования в качестве специфического метода научного познания, стирая грань между научным и техническим уровнем познания путем «технологизации» науки.

Литература

1. Р и ф к и н Д. ж. Третья промышленная революция: Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом. М.: Альпина нон-фикшн, 2014. 410 с.
2. Д а н и л и ш и н Б. М. Третья промышленная революция и Украина // Новое время, 25.10.2014. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://nvua.net/opinion/danylyshyn/17573.html>.
3. W a l l M. Space Station's 3D Printer Makes Wrench From 'Beamed Up' Design. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.space.com/28095-3d-printer-space-station-ratchet-wrench.html>.
4. Airbus had 1,000 parts 3D printed to meet deadline. Режим доступа: <http://www.bbc.com/news/technology-32597809>.
5. Выставка EuroMold 2014 во Франкфурте – продемонстрированы достижения в области технологий аддитивного производства. 8.12.2014 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.moldex3d.ru/events/6009>.
6. Ш и н с к и й И. О., Д о р о ш е н к о В. С. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям // Металл и литье Украины. 2009. № 4–5. С. 30–33.
7. 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.
8. Shambley W. P r e p a r e Your Technology Strategy for 3D Printing, Robotics, and the Cloud // Foundry Management & Technology. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://foundrymag.com/simulationit/prepare-your-technology-strategy-3d-printing-robotics-and-cloud>.
9. Fan, Zhiqiang and Liou, Frank, «Numerical Modeling of the Additive Manufacturing (AM) Processes of Titanium Alloy, in Titanium Alloys,» Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, ed. A. K. M. Nurul Amin, Rijeka, Croatia, InTech, 2012, p. 3–28.
10. Д о р о ш е н к о В. С. Математическое проектирование каркасно-ячеистых отливок // Литейное производство. 2013. № 2. С. 9–12.
11. O g a n o v A. R., L y a k h o v A. O., V a l l e M. How evolutionary crystal structure prediction works – and why // Acc. Chem. Res. 2011. Vol. 44. P. 227–237.
12. Патент Украины № 83902, МПК G06F 3/00. Способ распространения информации с применением технологий дополненной реальности / А. В. Дорошенко, В. С. Дорошенко. Оpubл. 2013, Бюл. 19.
13. Д о р о ш е н к о В. С. Трехмерная формовка из сыпучих материалов // Литейное производство. 2013. № 4. С. 8–11.
14. Патент Украины № 77595, МПК B22C 9/02. Способ изготовления изделий из сыпучего наполнителя / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко. Оpubл. 2013, Бюл. 4.
15. Заявка Украины № u201410278, МПК B22C 9/02. Способ формования / В. С. Дорошенко, В. О. Шинский. От 19.09.2014.
16. Д о р о ш е н к о В. С. О послойном печатании песчаной формы с дифференцированной прочностью // Литейное производство. 2015. № 4. С. 19–25.

References

1. R i f k i n D z h. Tret'ja promyshlennaja revoljucija: Kak gorizontaľnye 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. D a n i l i s h i n B. M. Tret'ja promyshlennaja revoljucija i Ukraina [Third Industrial Revolution and Ukraine]. *Novoe vremja – New time*, 2014.
3. W a l l M. Space Station's 3D Printer Makes Wrench From 'Beamed Up' Design.
4. Airbus had 1,000 parts 3D printed to meet deadline.
5. *Vystavka EuroMold 2014 vo Frankfurte* – prodemonstirovani dostizhenija v oblasti tehnologij additivnogo proizvodstva.

6. Shinskij I. O., Doroshenko 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. 405, pp. 30–33.
7. Doroshenko V. S. Sposoby poluchenija karkasnyh i jacheistyh lityh materialov i detalej po gazificiruemym modeljam [Methods for producing molded frame and cellular materials and components for the gas models]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry production*, 2008, no.9, pp. 28–32.
8. Shambley W. Prepare Your Technology Strategy for 3D Printing, Robotics, and the Cloud. *Foundry Management & Technology*.
9. Fan, Zhiqiang and Liou, Frank, “Numerical Modeling of the Additive Manufacturing (AM) Processes of Titanium Alloy, in Titanium Alloys” Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, ed. A. K. M. Nurul Amin, Rijeka, Croatia, InTech, 2012, pp. 3–28.
10. Doroshenko V. S. Matematicheskoe proektirovanie karkasno-jacheistyh otlivok [Mathematical design of cellular skeleton castings]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry production*, 2013, no. 2, pp. 9–12.
11. Oganov A. R., Lyakhov A. O., Valle M. How evolutionary crystal structure prediction works - and why. *Acc. Chem. Res.* 2011, vol. 44, pp. 227–237.
12. Doroshenko A.V., Doroshenko V. S. *Patent Ukrainy* 83902, MPK G06F 3/00. Sposob rasprostraneniya informacii s primeneniem tehnologii dopolnennoj real'nosti [A method of disseminating information using augmented reality technology]. Opubl. 2013, Bjul. 19.
13. Doroshenko V. S. Trehmernaja formovka iz sypuchih materialov [The three-dimensional shaping of bulk materials]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry production*, 2013, no. 4, pp. 8–11.
14. Shinskij O. I., Doroshenko V. S. *Patent Ukrainy* 77595, MPK V22S 9/02. Sposob izgotovleniya izdelij iz sypuchego napolnitelja [A method of manufacturing products from particulate filler] Opubl. 2013, Bjul. 4.
15. Doroshenko V. S., Shinskij V. O. *Zajavka Ukrainy* u201410278, MPK V22S 9/02. Sposob formovaniya [The molding process] 19.09.2014.
16. Doroshenko V. S. O poslojnom pechatanii peschanoj formy s differencirovannoju prochnost'ju [About printing layered sand mold with differentiated strength]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry production*, 2015, no. 4, pp. 19–25.

Сведения об авторе

Дорошенко Владимир Степанович, старший научный сотрудник, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина, Бульвар Вернадского, 34/1. E-mail: doro55v@gmail.com. Тел.: +38066-145-78-32.

Information about the authors

Doroshenko Vladimir, senior staff Scientist, Physikal and Technological Institute of metals and alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, Vernadskogo, 34/1. E-mail: doro55v@gmail.com. Tel.: +38066-145-78-32.