

УДК 621.74.045

В. С. Дорошенко, В. О. Шинский

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЕСЧАНОЙ ФОРМОВКИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ РАЗЛИЧНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ФАЗ

Процесс получения песчаных изделий 3D путем деформирования сочетает известные способы песчаной формовки с компьютерным управлением. Применение в песчаной формовке физико-химических явлений, связанных с криотехнологией, виброуплотнением песчаной смеси и неорганическими материалами с возможностью их повторного использования, ведет к экономии затрат. Такие процессы расширяют возможности формовки, прежде всего, с учетом экологической безопасности литья.

Ключевые слова: формовка, сыпучие материалы, деформирование, вакуумирование, ВПФ, фильтрационная формовка, кристаллогидраты.

Процес отримання піщаних виробів 3D деформуванням поєднує відомі способи піщаного формування з комп'ютерним управлінням. Застосування в піщаному формуванні фізико-хімічних явищ, пов'язаних з криотехнологією, віброущільненням піщаної суміші і неорганічними матеріалами з можливістю їх повторного використання, веде до економії витрат. Такі процеси розширюють можливості формування, насамперед з урахуванням екологічної безпеки лиття.

Ключові слова: формування, сипучі матеріали, деформування, вакуумування, ВПФ, фільтраційне формування, кристалогідрати.

The process of obtaining products sandy 3D deformation combines known techniques of molding sand under computer control. Application in the sand molding physicochemical phenomena associated with cryotechnology, the vibro-sand mixture and inorganic materials with the possibility of re-use leads to cost savings. These processes extend the capabilities of molding, especially in view of environmental safety casting.

Keywords: molding, bulk materials, deformation, vacuum, V-process, filtration molding, crystalline hydrates.

Рост машиностроения пропорционально увеличивает потребление отливок, объем мирового производства которых в 2012 г. достиг 100,8 млн. т [1]. До 80 % литья получают в песчаные формы (включая отдельные спецвиды литья), что сохраняет актуальность развития теории и технологии литейной формы с учетом растущих требований экологии. Однако на фоне ликвидации более 10 научно-исследовательских институтов литейного производства в странах СНГ снизилось число публикаций в области технологии формы и практически свернулось отечественное производство формовочного оборудования. Но, помня о прежних лидирующих позициях советских «формовочных» научных школ, следует продолжать совершенствование процессов песчаной формовки. С позиций экологической безопасности, ресурсосбережения и компьютерного мониторинга представляется перспективным вакуумно-, крио- и фильтрационное направление песчаной формовки, среди которых имеются процессы, созданные научной школой проф. О. И. Шинского, рассмотренные в данной статье.

Среди современных технологий, хорошо зарекомендовавших себя в производстве, особенно популярна технология быстрого прототипирования (Rapid Prototyping, RP), которая произвела переворот в изготовлении и проектировании изделий, в частности, для литейного производства. Она запатентована в 1993 г. Массачусетским технологическим институтом, основана на принципе струйной печати и, используя

материал в виде порошкообразной смеси различных типов, позволяет по данным CAD файлов изготавливать литейные модели и формы (огнеупорностью до 1100 °С). Перспективность этого способа также отмечена акад. НАН Украины Н. В. Новиковым в его выступлении на выездном заседании Бюро Отделения НАН Украины в ФТИМС НАНУ в конце 2013 г.

В России технология RP хорошо себя показала в мелкосерийном и серийном производствах отливок для авиационной промышленности [2]. Хотя «возраст» этой технологии уже превышает 20 лет, состав материалов для изготовления моделей и форм таким способом является коммерческой тайной. Остаются неизвестными теплофизические и технологические (газопроницаемость, газотворность, гигроскопичность, и другие) свойства материалов, что затрудняет использование САПР для моделирования изделий и процессов, а также мониторинга их характеристик.

Технология RP также расширяет свое применение в строительстве. Например, в настоящее время по проекту Stone Spray Project создан робот на солнечных батареях, который по команде с ноутбука в полевых условиях выполняет 3D «печать» путем напыления масштабных каркасных легковесных строительных конструкций из подручных дисперсных минеральных материалов (песка и почвы) при замешивании их в непрерывно действующем смесителе с жидким самотвердеющим связующим веществом [3].

Кроме того, для изготовления литейных моделей и песчаных форм с высокой точностью и системами мониторинга размеров все шире используют станки с ЧПУ в виде 3D - фрезеров [4]. Однако фрезерование дает много отходов в виде стружки, ряд материалов на основе песка плохо обрабатывается из-за высокой твердости его зерен и хрупкости тонких изделий.

В связи с этим ученые под руководством проф. О. И. Шинского в ФТИМС НАН Украины создали способ изготовления изделий из сыпучего наполнителя путем трехмерного или 3D деформирования заготовки из сыпучего зернистого наполнителя [5]. Этот способ предназначен для производства как песчаных литейных форм, стержней и моделей, так и строительных, керамических изделий. Наиболее близким к этой технологии является способ изготовления изделий из сыпучего наполнителя, включающий изготовление заготовки с покрытием ее эластичной синтетической пленкой, вакуумирование этого наполнителя и последующее деформирование данной заготовки по заданной форме. В качестве примера в монографии [6] описан опыт немецкого исследователя Гаазе, который, вакуумировав наполовину заполненную песком камеру футбольного мяча, «вылепил» из нее вазу. Камера с вакуумируемым песком представляла собой пластическое тело, хорошо сохраняющее форму после деформации. Подобного вида песчаные стержни изготавливают вакуумно-пленочной формовкой (ВПФ) в стержневых ящиках, используя вакуумпровод с фильтром для вакуумирования песка в центральной части стержня, однако в известных способах ВПФ операции деформирования стержня не предусмотрены.

В основном варианте разработанного способа [5] использованы физические явления при воздействии на песчаную смесь четырех известных процессов в области песчаной формовки: деформирование прессованием; упрочнение под вакуумом; твердение холоднотвердеющей смеси (ХТС); принудительная фильтрация. Поочередно рассмотрим основные признаки этих процессов в применении к нашему случаю.

Согласно теории механики грунтов, песок, составляющий основу формовочных смесей, является сыпучим материалом, не имеющим сил сцепления между частицами, но обладающим силами внутреннего трения. При прессовании происходит деформация сдвига, в результате которой часть песка перетекает из одного объема в другой. При виброуплотнении, как быстром повторно-переменном нагружении, деформирование протекает путем тонкого скольжения по отдельным поверхностям в зерновой среде песка, что требует меньших силовых воздействий и заданное деформирование достигается многократными подвижками слоев песка. Заготовка из

сыпучего наполнителя при деформировании со стороны деформирующего элемента (ДЭ) поглощает поступающую от него энергию, расходуя ее частично на уплотнение, частично на трение, возникающее в сыпучем наполнителе между его частицами. Применение вибрации со стороны ДЭ позволяет снизить трение в наполнителе за счет колебания его частиц.

Известны зависимости влияния величины вакуума на прочность и твердость сыпучего песка в вакуумируемой песчаной форме при ВПФ [6]. Прочность вакуумируемого песка практически пропорциональна величине разрежения воздуха в его порах. В нашем случае прочность и твердость песчаного наполнителя изменяют в процессе деформирования исходной песчаной заготовки в зависимости от применяемых режимов и инструмента. Новыми решениями в разработанном способе являются использование вакуума как для регулирования прочности сыпучего наполнителя заготовки от полутвердого до твердого состояния в период деформирования заготовки, так и пропитки сухого сыпучего наполнителя жидким либо газообразным реагентом для связывания этого наполнителя подобно ХТС.

Традиционно твердение ХТС обусловлено созданием связующей композиции из (минимум) пары реагентов – связующего и отвердителя, взаимодействием которых создают адгезионно-когезионный комплекс в виде затвердевшей смеси литейной формы. В нашем способе деформирования заготовки невысокий вакуум с остаточным давлением 20-90 кПа, который традиционно используют при ВПФ, используют для фильтрационной формовки – принудительной пропитки в поры песка проникающего реагента из пары «связующее–отвердитель». Соответствующий второй реагент этой пары предварительно добавляют в сыпучий наполнитель. Аналогичные процессы фильтрационной формовки описаны в работах [7, 8]. В результате отверждения наполнитель (ХТС) цементируется в виде изделия заданной конструкции с последующим отключением вакуумирования и открепления изделия от вакуумпровода и вакуумного насоса.

С возрастанием величины вакуума растет скорость пропитки реагентом наполнителя. На величину вакуума (кроме мощности насоса), в любой точке тела сыпучего наполнителя можно влиять газопроницаемостью наполнителя и/или величиной расстояния (используя сопротивление фильтрации в порах наполнителя) от этой точки до фильтра вакуумпровода, контактирующего с сыпучим наполнителем. Выполнять операции четырех формовочных процессов можно в ручном режиме, либо с участием системы управления и компьютерного мониторинга изменения во времени размеров и состояния поверхности деформируемой заготовки, аналогичной известным системам RP, 3D-фрезера или 3D-деформирования металлических заготовок, что позволит автоматизировать способ изготовления изделий 3-мерной формовкой деформированием заготовок из сыпучего наполнителя.

При реализации способа деформирования предварительно изготавливают заготовку (с полостью или без) из сыпучего наполнителя по технологии ВПФ. В качестве примера реализации способа на рис. 1 показана схема установки для изготовления из песчано-гипсовой сухой сыпучей смеси модели подставки под колонну. Куполообразные отливки колоколов, емкостей нередко для литейных цехов. В разрезе показана такая заготовка из сыпучего материала 1. Ее стенки с двух сторон покрыты эластичной синтетической пленкой (для упрощения не показана), а основание закреплено к столу 2. Над столом расположен подвижный

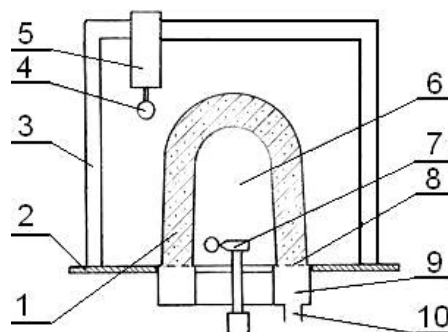


Рис. 1. Схема установки для 3D-деформирования: 1 – сыпучий материал; 2 – стол; 3 – П-образный портал; 4 – инструмент с ДЭ; 5 – подвижный привод; 6 – заготовка; 7 – привод с инструментом; 8 – перфорированная стенка; 9 – вакуумпровод; 10 – штуцер

П-образный портал 3, на котором имеется подвижный привод 5 с инструментом 4 с ДЭ. Заготовка выполнена в виде колокола с полостью 6, куда могут заводить привод 7 с инструментом, аналогичным 4. Заготовка из сыпучего наполнителя изготовлена в контакте с основанием – вакуумпроводом в виде коробчатого обода 9 с газопроницаемой перфорированной стенкой 8, не пропускающей песок. Пустота обода 9 через штуцер 10 подключают трубопроводом к вакуумному насосу. Подобные заготовки с полостью или без нее в виде песчаных стержней получают ВПФ-процессом. Для облицовки обычно используют эластичную синтетическую пленку толщиной 0,05-0,10 мм марок EVA, сэвилен по ТУ2245-561-00203521-2002 или другие с возможностью не менее чем 6-кратного относительного удлинения пленки.

При изготовлении из сухой сыпучей песчано-гипсовой смеси модель подставки под колонну применяли сухой песок с добавкой 10-20 % полуводного гипса и 0,5-1 % цемента, ускоряющего твердение гипса. Песчаную заготовку формовали в оснастке, подобной стержневому ящику со стенками, предварительно покрытыми эластичной синтетической пленкой. В контакт с песком 1 вводили перфорированную стенку 8 вакуумпровода 9, герметизировали стыки концами этой пленки, выступающей за пределы песка и лежащей на стенках вакуумпровода. Вакуумпровод затем подключали к вакуум-наосу через штуцер 10 трубопроводом, на котором смонтированы вакуумметр и кран. Заготовка 6 из сыпучего наполнителя 1 под вакуумом приобретает прочность, ее устанавливали и крепили к столу 2.

В простейшем варианте подобно Гаазе заготовку из сухой песчаной смеси 1 деформировали ручным инструментом снаружи и со стороны полости в соответствии с чертежом модели отливки. При этом прочность и твердость сыпучего наполнителя в стенке заготовки во время деформирования регулировали путем изменения величины вакуума с контролем его по вакуумметру. Требуемые по чертежу размеры заготовки контролировали заранее вырезанными из картона шаблонами.

Затем закрепляли (связывали) сыпучий материал вакуумируемой заготовки методом фильтрационной формовки. Начиная с дальнего места от вакуумпровода 9, шприцом вводили реагент (жидкую композицию) в песчаную смесь, прокалывая иглой эластичную синтетическую пленку произвольно с шагом 50-120 мм и заклеивая скотчем образовавшиеся отверстия. Эта композиция состояла из водного раствора жидкого стекла плотностью до 1,08 кг/м³, поскольку жидкое стекло служит ускорителем твердения гипса и цемента. При введении шприцом такой композиции сквозь пленку было видно потемнение материала, а при добавлении в композицию красителя (чернила) – закрашивание материала распространением под вакуумом жидкости в песчаной смеси.

Скорость пропитки (фильтрации) можно регулировать изменением величины вакуума, при этой операции использовали максимальную его величину. Дальние слои от вакуумпровода пропитывались медленнее, чем ближние, за счет ослабления разрежения по мере удаления от вакуумпровода. Тем не менее, пропитка была завершена в течение нескольких минут. Водная композиция, смачивая гипс, создавала с ним связующую композицию, которая твердела за 8-15 мин. При получении начальной прочности смеси, достаточной для сохранения размеров заготовки, вакуум отключали, дальнейшее твердение происходило на воздухе, после чего полученное песчаное изделие отправляли на окраску и сушку. Такими изделиями могут быть «постоянная» модель для формовки из смесей со связующим, песчаный стержень или безопочная литейная форма.

Связывание песка освобождает песчаное изделие от привязки к трубопроводу и прекращает его вакуумирование, связанное с затратами электроэнергии. Изделие можно хранить на складе и использовать через длительное время, что способствует гибкости производства. Аналогичные сыпучие наполнители (песок, крошка или щебень с вяжущими – цемент, гипс и др.) применяются для производства строительных изделий, керамических материалов и декоративно-художественных изделий (ваз, скульптур и другие). При этом пропитка водой или другим веществом пористой

среды дисперсного материала обеспечит перевод его из сыпучего состояния в камневидное. В настоящее время происходит «бум» развития технологии сухих строительных смесей с наращиванием их промышленного производства и использования в строительстве, что позволяет для получения фасонных строительных или декоративных изделий использовать готовые покупные сухие смеси, добавляя при необходимости в их состав дисперсный наполнитель.

Среди известных в литейном производстве связующих композиций в качестве пар твердеющих реагентов для предлагаемого способа формовки в лабораторных условиях опробовали пропитку водой гидратационных вяжущих (гипс, цемент) в смеси с сухим песком, а также водным раствором жидкого стекла (в качестве связующего) песка с добавкой соединений кальция (феррохромового шлака). Планируется обработка фильтрации сложных эфиров или углекислого газа в качестве отвердителя песка после его пропитки раствором жидкого стекла по аналогии с CO_2 -процессом, а также пропитка водным раствором технических лигносульфонатов как связующим сыпучей смеси песка с хромовым ангидридом как отвердителем. Применение синтетических смол в качестве связующего возможно с их отвердителями. Вводили следующие пары твердеющих реагентов: порошковый – в состав сыпучего наполнителя, жидкий – в состав пропитки. После пропитки связующим (жидким стеклом) возможна дополнительная продувка газом-отвердителем связующего (углекислым газом) через наколы в эластичной синтетической пленке.

Выполнение заготовки с полостью позволяет сделать тонкими ее деформируемые стенки и уменьшить усилие деформации, а применение устройств с ЧПУ – автоматизировать процесс. Кроме того, выбрав режим движения инструмента с ДЭ по компьютерной программе или опытным путем, можно использовать этот режим в станке – 3D – фрезере, например, заменив фрезу на инструмент с роликом или шариком. В качестве ДЭ можно использовать механизм, применяемый в игольчатом принтере, или наконечник, подвергаемый вибрации. При необходимости термопластичная синтетическая пленка для облегчения ее растяжения-усадки с целью деформирования заготовки может нагреваться, контактируя с инструментом, в который встроен нагреватель.

Среди разновидностей способа также предусмотрен вариант изготовления изделий, в которых в качестве сыпучего наполнителя используют легкоплавкий пенополимер в виде крошки, гранул или порошка. К таким изделиям относятся пенопластовые модели, связывание зернистого материала которых возможно легкоиспаряемой жидкостью (ацетон, растворитель 646, живичный скипидар или их смесь), в жидком или парообразном виде частично растворяющей поверхность зерен этого материала. Среди вариантов предложенного способа формования – применение сыпучего дисперсного льда, что позволит таким путем получать ледяные модели, связывание материала которых возможно фильтрацией воды с температурой около 0°C , либо оплавлением поверхностного слоя нагреванием от ДЭ с последующим охлаждением в морозильной камере.

В настоящее время реализация способа находится на стадии опытно-промышленного опробования. Компьютерное управление деформированием вакуумируемой заготовки из сыпучего наполнителя целесообразно выполнять аналогично применяемому для 3D-фрезеров, установок RP и т. п. Рассмотренные разновидности способа позволят увеличить гибкость производства, способствуют его автоматизации и повышению точности изделий.

Рассмотрим другой способ использования сыпучих дисперсных систем для повышения возможностей песчаной формовки. При получении примерно 95 % песчаных форм зерна смеси перед уплотнением замешивают со связующим (часто с водой), которое смачивает, обволакивает – плакирует зерна наполнителя, образуя на них сплошную пленку. Вода, смачивая зерна кварцевого песка, сама является слабым связующим. При уплотнении эти пленочные оболочки связующего взаимно склеиваются, образуя манжеты, благодаря чему смесь приобретает прочность как

адгезионно-когезионный комплекс, согласно общей концепции прочности дисперсных систем [9]. Зерна наполнителя, покрытые связующим, контактируют через слои пленок, а приготовление смеси перемешиванием и ее уплотнение связано с деформацией, разрушением одних клейких манжет и образованием новых. Это требует значительных затрат на оборудование, оснастку и энергию для перемешивания и уплотнения смесей или расходов на перевод смесей в жидкоподвижное состояние с их избыточным увлажнением и энергоемкой сушкой. Прочность смесей определяется прочностью манжет, а сплошная пленка связующего не только склеивает зерна, но и покрывает их поверхность вокруг пор смеси, на что расходуется основная часть связующего. Неплотное прилегание зерен песка из-за этой пленки не только тратит лишнее количество связующего, но и способствует пригару на отливке, поскольку огнеупорность пленки связующего, как правило, ниже, чем у песчинки.

Менее затратный способ приготовления и уплотнения смеси – при вакуумной формовке (ВПФ и ЛГМ) из сыпучей смеси свежего и отработанного песка без дорогостоящих формовочных машин (кстати, выпуск формовочного оборудования практически свернут в странах СНГ) и значительных энергозатрат. Готовят такие смеси, как правило, без смесителя добавлением свежего песка в систему оборотного охлаждения отработанной смеси часто на базе пневмотранспорта. Уплотняют такие сухие смеси в течение 30–90 с на вибростоле при стыковке зерен наполнителя своей поверхностью практически без пленок связующего. Отсюда, решение об экономии затрат на операциях перемешивания и уплотнения смеси, а также за счет снижения связующего, привело к созданию способа формовки из сыпучих зерен кварцевого песка, порошка кристаллогидратов и льда.

При реализации способа предварительно смешивали известными способами сухую минеральную основу смеси из песка, гипса и/или цемента. Затем совмещали засыпание формовочной смеси на модель или в рабочую полость стержневого ящика с введением в эту смесь сыпучего зернистого льда путем смешивания ссыпанием струи зерен льда со струей зерен минеральной основы в один поток с одновременной вибрацией формовочно-модельной или стержневой оснастки. Такой способ смешивания ссыпанием в один поток двух потоков зернистых материалов на движущиеся от вибрации поверхности формообразующей оснастки позволяет быстро смешивать и уплотнять зерна в сыпучем виде без минимального таяния льда или с ним.

Движение зерен между собой продолжалось при попадании на поверхность указанной оснастки или предыдущих слоев смеси, зерна рассыпались при движении по инерции и от вибрации оснастки с уплотнением всей массы смеси. Вибрация уменьшает внутреннее трение зерен до состояния «псевдожидкости», укладывая песчинки кварца в максимально возможный плотный каркас с размещением между ними при пористости 33–36 % [10] частиц связующего и льда соответствующей крупности. Затем в процессе таяния льда смесь увлажняется и в результате гидратации кристаллогидратов в составе гипса и цемента (есть и другие варианты) твердеет до монолитного состояния в виде песчаной формы или стержня. Конечной целью смешивания смеси является равномерное ее увлажнение, что достигается капиллярным перемещением влаги [11], которое еще называют капиллярным транспортом [12]

Кратковременность смешивания зернистого льда с минеральной основой смеси ссыпанием их струй с попаданием результирующей струи в полость подвергаемой вибрации формовочной оснастки не вредит гомогенности смеси, которой способствует самопроизвольное распространение влаги в песчаной смеси сорбционно-фильтрационным способом. Образование кристаллогидратов с поглощением воды называют хемосорбцией, при которой выделяется тепло, ускоряющее таяние льда. Возможны и другие способы смешивания, включающие охлаждение смеси или ее компонентов, а также последующее длительное хранение готовой сыпучей смеси в морозильнике.

В качестве примера на рис. 2 показан литой под давлением алюминиевый ба- рельеф «Мефистофель» по которому, как по металлической модели, выполнена

полуформа из описанной сыпучей смеси с зернистым льдом. Уплотнение смеси вибрацией дало отпечаток достаточно высокого качества. Составы смеси по содержанию кристаллогидратов или гидратационных вяжущих (второе название присуще для промышленности строительных материалов) относительно воды в замороженном виде выбирали в зависимости от требуемой прочности затвердевшей смеси с учетом того, что, например, образование двухводного гипса на 1 кг полуводного гипса потребляет 186 г воды, а двухводный гипс в связанном виде содержит 20,9 % воды [13]. Для различных условий литья возможна широкая гамма составов таких формовочных смесей. Минимизации влажности и экономии льда в простейшем по количеству компонентов варианте смеси достигали при составе из кварцевого песка, гипса и зернистого льда в таких пределах; в %: гипс полуводный – 10-40, лед – 4-8, остальное – песок.



Рис. 2. Металлическая художественная модель и полученная по ней полуформа

После заполнения оснастки, для повышения уплотнения на поверхность смеси можно установить груз, который ускоряет своим давлением таяние ледяной составляющей. После таяния льда твердение обычно происходило в течение 10 мин и состояло в преобразовании дисперсной системы в «конденсированное» состояние с образованием интерфазной структуры из дисперсных разнородных частиц по закономерностям гидратообразования и структурообразования как синтеза прочности [14]. Достигнутый невысокий уровень влажности требует меньших затрат на сушку полученного песчаного изделия по сравнению с наливными кристаллогидратными смесями или позволяет использовать его без сушки в зависимости от различных литейных условий, например, с применением вакуумирования формы.

Этот способ формовки в заявке на патент также включает вариант изготовления оболочковых форм. Гипс, цемент или другие кристаллогидраты в составе таких песчаных смесей от теплового воздействия металла дегидратируются и могут вновь твердеть при увлажнении, что позволяет применять обратные кристаллогидратные смеси с обновлением их свежими материалами до 10 % [15] и относить их к смесям с неорганическими связующими, мало загрязняющими окружающую среду.

Описанные способы формовки используют разнообразное взаимодействие фаз дисперсных систем. Введение жидкой фазы в дисперсионную среду наполнителя описанных составов приводит в итоге к созданию адгезионно-когезионного ком-

плекса связанной смеси. Движение сыпучих зерен (дисперсной твердой фазы) в воздухе (дисперсионной среде) используют в первом способе для деформации, а во втором – для смешивания зерен. Распространение дисперсной жидкой фазы осуществляют преимущественно принудительной (с вакуумированием) или самопроизвольной капиллярной фильтрацией в дисперсионной среде пористой песчаной смеси как операцию равномерного увлажнения смеси. Применение в процессах песчаной формовки физико-химических явлений с сочетаниями взаимодействий различных дисперсных фаз, кратковременного виброуплотнения песчаной смеси, присущего ВПФ и ЛГМ, и преимущественно недорогих неорганических материалов способствует уменьшению экономических затрат на производство форм, а также увеличивает возможности формовки с учетом экологической безопасности процессов литья.



Список литературы

1. Быстров Ю. А. Мировое производство литья в 2012 г. // Литье Украины. – 2014. – № 2. – С. 34-38.
2. Дрокина В. В., Белов В. Д. Некоторые аспекты изготовления отливок методом быстрого прототипирования // Труды IX съезда литейщиков России. – Уфа: 2009. – С. 298-299.
3. Yirka Bob. Researcher use robot arm to print 3D sand structures // PHYS.org.com. 6 Aug. 2012. P. 1/2. <http://phys.org/news/2012-08-robot-arm-3d-sand.html> (дата обращения: 10.05.2014).
4. Дорошенко В. С., Шинский И. О. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям // Металл и литье Украины. – 2009. – № 4-5. – С. 30-33.
5. Патент UA 77595, МПК В22С 9/02. Способ изготовления изделий из сыпучего наполнителя / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко. – Опубл. – 2013, Бюл. 4.
6. Минаев А. А. Вакуумная формовка. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
7. Знаменский Л. Г. Фильтрационное формообразование гелеобразующих систем в точном литье // Литейн. пр-во. – 1997. – № 4. – С. 34.
8. Знаменский Л. Г., Ивочкина О. В., Ермаков И. Н. Электроимпульсно-фильтрационные технологии изготовления литейных стержней и форм // Вестник ЮургУ. – 2007. – № 13. – С. 39-42.
9. Жуковский С. С., Ромашкин В. Н. О «шаровой» модели формовочной смеси // Литейн. пр-во. – 1986. – № 3. – С. 12-13.
10. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: Профессинал, 2007. – 408 с.
11. Смоляницкий Л. А. Капиллярное увлажнение грунтов земляных сооружений // Вестник ВГУ, серия: геология. – 2012. – № 1. – С. 229-233.
12. Либенсон Г. А. Производство порошковых изделий. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
13. Примеры и задачи по строительным материалам / Под ред. П. Ф. Шубенкина. – М.: Высш. школа, 1970. – 232 с.
14. Сычев М. М. Твердение вяжущих веществ. – Л.: Стройиздат, 1974. – 80 с.
15. Гамов Е. С. Расчет освежения оборотных кристаллогидратных самотвердеющих смесей // Литейн. пр-во. – 1978. – № 2. – С. 16-17.

Поступила 19.05.2014