СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОНИТОРИНГА ЛИТЕЙНОГО ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ФОРМОВКИ ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ



В.С. Дорошенко

Автор статьи представляет разработку экоинновационной технологии и создание информационных систем мониторинга литейного процесса производства металлозаготовок, которые выполнены как два параллельных направления. Приведена схема последовательности технологических операций литья по ледяным моделям и перечень характеристик для мониторинга этих операций. Рассмотрены физико-химические процессы, положенные в основу фильтрационной формовки по ледяным моделям.

Основой развития экономики стран мира является машиностроение, в продукции которого литые металлические детали составляют до 40%, а в некоторых видах машин до 70...80% их веса. Можно без преувеличения сказать, что без восстановления и модернизации литейного производства невозможен выход из кризиса машиностроения и экономики в целом. Литейные процессы совершенствует технологическое использование науки, в том числе со снижением загрязнения экосистемы литейными отходами. В России при производстве 1 т отливок из чугуна и стали выделяется около 50 кг пыли, 250 кг окиси углерода, 1,5...2,0 кг окиси серы, 1 кг окиси углеводородов и до 5 т твёрдых песчаных отходов. Особенно экологически небезопасны литейные формы с синтетическими смолами и другими органическими связующими, которые дают до 70% загрязнений природной среды от литейных цехов (по данным проф. Ткаченко С.С.).

Поиск экологически безвредных процессов литья металлов привел литейщиков к применению льда для разовых литейных моделей. Такой процесс включает изготовление изо льда модели отливки, формование модели в песчаную форму, таяние модели и освобождение от воды полости формы, затем заливки в эту полость металла, который после охлаждения образует отливку. Сегодня по традиционным технологиям легкоплавкие модели изготавливают из восковых и парафино-стеариновых смесей, пенопласта. Для литья без органических модельно-формовочных материалов, в частности связующих, следовали концепции получения по ледяным моделям оболочковых песчаных форм, в идеале ледяную модель представляли как стеклянную елочную игрушку, а оболочковую форму – как яичную скорлупу. Учитывали также такую аналогию: если пружину сжать и отпустить, она разожмется; если ледяную модель оставить в среде при комнатной температуре, она растает.

Агрегатные переходы воды: из жидкого в твердое при замораживании модели, опять в жидкое – таяние модели при освобождении полости литейной формы, а затем испарение при сушке увлажненной формы в какой-то мере подобны рециркуляции воды в природе. Для этих процессов вода на 30...90% и сухой песок формы на 80...90% (за вычетом песка, участвующего в образовании оболочки путем фильтрации – увлажнения) могут использоваться повторно с целью ресурсосбережения. С каждым годом в мире растет производство отливок по разовым моделям, называемое точным литьем с присущей ему экономией металла от максимального приближения отливки к конечной детали, и литье по моделям из замороженной воды относится к таким специальным способам литья.

Литейным технологиям, наряду с привлечением достижений физико-химии, как и многим процессам производства, присуща тенденция все более полной передачи машинам функций человека, в частности, функции технологического изменения обрабатываемого материала, контрольно-измерительной и самой важной и сложной функции – логической на основе использования современных компьютерных технологий. Закономерность проникновения средств информатики в производственные процессы предприятий связана с компьютерным мониторингом этих процессов и состояния оборудования. Отсюда разработку новых технологических процессов рационально проводить сразу с учетом возможности «визуализации» их характеристик на мониторе компьютера с дальнейшим развитием в направлении логической обработки и автоматизации.

Основными целями мониторинга являются контроль за выполнением литейных операций и функционированием оборудования, ресурсосбережение и улучшение условий труда, а также обеспечение качества выпускаемых отливок. Литейный цех относится к горячим цехам, насыщенным промышленными вредностями. Задачи мониторинга и контроля, которые критичны к условиям работы датчиков в таких



Рис. 1. Схема процесса литья по ледяным моделям

Лед как конструктивный материал разовых моделей отвечает экологической идее применения саморазрушающихся после выполнения своих функций материалов, приближая процесс литья к безвредному обмену веществ с окружающей средой.

Владимир Степанович Дорошенко, к.т.н., Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, Киев, Украина.

Работа выполнена под руководством профессора О.И. Шинского, с участием инженера Ю.Н. Иванова

Таблица 1. Пределы характеристик для мониторинга операций по схеме на рис. 1

Операции	t° C	τ	m, кг	P, кПа, или h, мм
1		10...600 с	0,1...100	
2	-5 ... 30			
4, 8	-30...30			
6	-30...5	300...3000 с		
9	-30...5			
10	0...30	0...600 с		
11	-30...5			
12	-30...30		0,05...50	
13			0,05...30	
15, 17	-30...35			
16			0,5...500	
18		20...200 с		h= 0,5...100 мм
19	20...120			
20		1...24 час.		
21	20...600	60...300 с		20...100 кПа
22	20...120			h= 1...200 мм
23, 24	20...500	0,5...10 час.		
25	200...1100	0,5...10 час.		
26	600...1700			
27	600...1700			20...100 кПа

цехах, в последнее время решаются с использованием беспроводных сенсорных сетей (БСС, англ. WSN — Wireless Sensor Network). Объединенные в БСС датчики образуют территориально-распределенную самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации для мониторинга параметров физических сред и объектов с целью управления ресурсами и процессами со стороны оператора.

Пооперационную организацию процесса литья по ледяным моделям, в схеме которого заложены характеристики, подлежащие мониторингу, показано на рис. 1. На этой схеме пронумерованы операции по их очередности и показаны виды характеристик из технического задания на проектирование системы мониторинга литейного процесса, проходящего стадию опытно-промышленной разработки.

Совокупность операций по изготовлению моделей обозначены номерами 1...11 и включает такие подразделы как изготовление собственно модели литой заготовки (1...7), а также складирование и монтаж блоков моделей (8...11). На схеме показаны операции замораживания модели из водной композици, состоящей из чистой воды или воды с технологическими добавками (связующим или отвердителем, ПАВ и др.) до 10%. Надпись включает название операции, а также измеряемой физической величины для мониторинга. Класс точности средств измерения датчиков предполагается 1,0 или 1,5 для всего процеса литья, кроме контроля температуры расплава металла датчиками классом точности 0,25 или 0,5. Приготовление жидких составов производится в мешалках с дозированием компонентов по массе m в пределах 0,1...100 кг, допускается дозирование по объему. Время τ выполнения операции перемешивания или охлаждения - в пределах 10...600 с, продолжительность замораживания - в пределах 300...3000 с, а температура охлаждения воздуха или материала t° - от -30° до +30° С.

Операции формовки в контейнере с применением сыпучего формовочного материала обозначены номерами 12...25 и включают такие подразделы как нанесение порошкового покрытия в виде полутвердой песчаной оболочки (12...14), засыпания модели с оболочкой сыпучим формовочным материалом и его уплотнение в контейнере (15...18). Варианты удаления модели с одновременным упрочнением формы (19...25) включают сушку и прокалку этой формы и относятся к разновидностям так называемой фильтрационной формовки, состоящей из фильтрации (пропитки) в поры сыпучего формовочного материала талой жидкости модели и твердения оболочковой формы путем взаимодействия компонентов этой жидкости с компонентами формовочного материала.

По температуре t° контролируют формовочный материал в пределах -30...+35°С, водную композицию - в пределах - 20...120°С, теплоноситель при нагревании модели - 20...600°С, воздух при сушке формы - 20...500°С, прокаливание формы 200...1100°С. Для операций заливки формы расплавом металла (26, 27, рис. 1) диапазон контроля температуры для черных металлов 1100...1700°С, алюминиевых и медных сплавов – 600...1300°С. Приготовление сухих составов в мешалках производится дозированием компонентов по массе m для песка в пределах 200...500 кг, для технологических добавок – 0,5...100 кг и или допускается дозирование по объему мерными емкостями. Продолжительность τ операций вибрации – 20...200 с, вакуумирования – 60...600 с, выстаивания – 1...24 часа, сушки и прокаливания 0,5...10 часов. Для оптимизации виброуплотнении формовочного материала предложено измерять уровень h этого материала в контейнере в пределах 0,5...100 мм, а при создании напора водной композиции – высоту ее столба h = 1...200 мм. Вакуумирование формовочного материала производят с остаточным давлением Р = 20...100 кПа.Указанные основные характеристики для контроля и их пределы сведены в табл. 1.

Полное описание патентов здесь и далее доступно на сайте http://uipv.org/

Поскольку схема литья на рис.1 базируется на недавних патентных источниках, рассмотрим подробнее наполняющие ее технологические процессы, основу которых составляет фильтрационная формовка в трех вариантах. Один из вариантов с элементами контроля качества формы наследует идею из технологии бурения скважин, в которой удержание (от обрушения) стенки формы производят давлением водной композиции аналогично удержанию стенки скважины давлением бурового раствора. Этот способ формовки включает нанесение на разовую ледяную модель сыпучего формовочного материала, плавления этой модели во время подачи через трубчатый выпор или стояк этой модели водной композиции, смешивание ее с расплавом модели и вместе с ним фильтрацию в формовочный материал под действием его вакуумирования или гидростатического давления, что способствует созданию в этом материале твердой песчаной оболочки, например, при наличии в сухом формовочном материале порошков таких недорогих кристаллогидратов, как гипс и/или цемент (пат. 79719 UA).

Во втором варианте акцентируется всасывание продуктов расплавления модели в песок под действием вакуума. Это позволяет наносить герметизирующее покрытие на поверхность образованной полости формы путем осаждения гелеобразующего материала при фильтрации продуктов расплавления модели, в которую предварительно вводят такой материал (пат. 80235 UA). Такая герметизация поверхности полости формы напоминает кольматацию в технологии бурения или герметизацию жидким компонентом как вариант, близкий к упрочнению формы методом вакуумно-пленочной формовки (ВПФ). Подачей через трубчатый выпор или стояк этой модели нагретого жидкого компонента также используют последний как теплоноситель для ускорения плавления ледяной модели (пат. 89664 UA).

В этих способах присутствуют три операции: плавление модели, удаление фильтрацией расплава модели в формовочный материал с образованием полости формы и создания в этом материале твердой песчаной оболочки. Сочетание практически одновременно протекающих операций дает преимущество (по сравнению с традиционным ЛВМ) в том, что, освобождая отформованную полость формы, разовая модель удаляется, «участвуя» своим расплавом в создании твердой песчаной оболочки.

В вышеописанных решениях по аналогии с ЛГМ применяли принудительную фильтрацию продуктов деструкции модели путем вакуумирования формовочного материала, или создания перепада давления газа (пат. 80381 UA) или жидкости (пат. 74539 UA). Для ускорения этих операций также применяли нагревание ледяной модели предварительно нагретым формовочным материалом (пат. 83891 UA), подачей через трубчатый выпор нагретой жидкости (пат. 91282 UA) или газа, или пропусканием электротока через модель с помощью электродов (пат. 76132 UA). Такие способы расширяют разнообразие технологии, но требует энерго- и трудозатрат, времени и специального оборудования, а заливка через трубчатый выпор водной композиции увеличивает время сушки формованного изделия.

Кроме того, излишний нагрев материала модели без указанного ограничения в ряде случаев вредит процессу твердения и получения качественных оболочковых форм. Как указано в учебнике для вузов строительного профиля (Волженский А.В. и др.), повышение температуры гипсового теста до 40...46° С способствует ускорению его схватывания, а выше этого предела, наоборот, - замедлению. При температуре гипсовой массы 90...100° С схватывание и твердение прекращаются. Хотя вакуумирование во многих случаях ускоряет формовку, но усложняет ее и приводит к значительному браку форм тем, что потоки воздуха засасываются вакуумом в увлажненную жидкостью от таяния модели стенку формы и приводят к образованию каверн в этой стенке. Аналогичное наблюдается при ВПФ, когда в пленке появляется отверстие, то под ним образуется каверна при потере герметичности формы.

Характерно, что в перечисленных способах литейщик воздействовал на ледяную модель аналогично традиционным стереотипам для ЛВМ и ЛГМ с операциями «дать энергию - расплавить» и «дать вакуум - удалить продукты деструкции модели». Ледяная модель «подсказала» новое несложное решение - вода легко просачивается (фильтруется) в поры песка и при добавлении твердеющих реагентов в состав модели и/или в песок образует корку на глубину фильтрации этих реагентов.

С целью уменьшение затрат на формовку с указанными принудительными воздействиями на модель, вспомнив аналогию со сжатой пружиной, в связи с которой при комнатной температуре окружающей среды ледяная модель находится в «нестабильном» состоянии, решили дать возможность самопроизвольного протекания трех операций «плавления - удаления - твердения» путем выстаивания литейной формы до момента создания твердой оболочки песчаной формы. Так был предложен вариант фильтрационной формовки (п. 20 на рис. 1), основанный на том, что силовое взаимодействие талой воды с минеральными частицами формовочного песка определяется гидрофильностью этих частиц (Цытович Н.А.).

По своей природе минеральные частицы почвы (диоксид кремния, оксиды других металлов) заряжены отрицательно, а молекулы воды представляют диполи, заряженные положительно на одном (атом кислорода) и отрицательно на другом (два атома водорода) конце. При контакте минеральной частицы с водой возникают електромолекулярни силы взаимодействия, которые притягивают диполи воды к поверхности этих частиц с большой силой (особенно первые слои), и чем больше удельная поверхность частиц, тем большее количество молекул воды будет находиться в

связанном состоянии. Это объясняет впитывание и удержание воды адсорбционно - капиллярными силами в среде формовочного песка (Битюрин А.К. и др.). Если в слой песка поступило больше воды, чем он способен удержать этими силами, то избыток влаги перетекает в слой, лежащий под ним.

Термин «выстаивание» (для твердения) обычно присущ процессу изготовления бетонных изделий (пат. 14009 UA), в которых операция твердения протекает в течение определенного времени. А наглядный пример действия капиллярных сил можно наблюдать при раскапывании сухого песка на пляже у водоема до уровня влажного песка. И чем глубже копать, тем больше воды в нем будет, несмотря на то, что уровень водоема расположен гораздо ниже. В зависимости от размеров песчинок вода поднимается на высоту 30...60 см (Котов. В., «Наука и жизнь» № 6 - 2003). Прилегающие друг к другу песчинки образуют множество капилляров, а вода поднимается по стенкам капилляров за счет электромолекулярных сил. Чем уже капилляры (мельче песчинки), тем меньше масса находящейся в них воды и соответственно на большую высоту она поднимается. Подобное явление называют капиллярным транспортом (Либенсон Г.А.).

Общая схема третьего варианта формовки включает нанесение сыпучего формовочного материала на ледяную модель. Этот материал ни нагревается, ни охлаждается, а берется с температурой помещения литейного цеха около 20° С. Модель состоит из замороженной водной композиции как правило при температуре -20...- 10° С. После нанесения на модель формовочного материала в виде порошкового покрытия или облицовки с последующим дополнительным засыпанием формовочным материалом и виброуплотнением в контейнере, или без такового, модель нагревается от окружающего материала и через некоторое время (обычно от 1...2 до десятков минут) начинает таять, потом таяние продолжается в течение примерно такого же времени.

Последний процесс формовки основан на следующих физико-химических явлениях. Для фильтрации (благодаря адсобционно-капиллярным силам) талой водной композиции сухим сыпучим формовочным материалом компоненты для этих композиции и материала подбирают так, что они образуют вяжущую композицию, которая приводит к созданию твердой оболочки на глубину фильтрации (пропитки) компонентов. Высокомолекулярные компоненты обычно оседают в ближних к модели слоях. Гидрофильность кварцевых зерен приводит к обволакиванию их водным раствором гелеобразующего или связующего материала (при введении его в состав талой композиции) и молекулярном сцеплению между ним и песчинками. Если в одном из примеров формовочный материал содержал сухой песок с порошком гипса (или цемента), то талая вода от модели при впитывании стенками формы и капиллярном отсасывании (Сычев М.М.) ее (как дисперсионной среды) служила отвердителем гипса и увеличивала прочность сцепления (адгезию) его с зернами песка, в результате создавая твердую оболочку. При этом твердение обычно происходило в течение от нескольких до десятков минут и состояло в преобразования дисперсной системы в «конденсированное» состояние - образование интерфазной структуры из дисперсных разнородных частиц.

Даже для чистого кварцевого песка вода имеет высокое поверхностное натяжение, сама являясь слабым связующим. Прочностные свойства многих связующих органического (лигносульфонаты, декстрин, пектиновый клей, патока и др.) и неорганического (глина, цемент, гипс, жидкое стекло и т.д.) происхождения проявляются только в присутствии воды, что дает преимущество ледяным моделям, которые поставляют воду при своем таянии. Для проявления адгезии нужен тесный контакт адгезива с субстратом. Такой контакт клеющего компонента со склеиваемыми частицами обеспечивает фильтрация талой водной композиции, а основой механизма твердения указанных связующих является гидратообразование и структурообразование как синтез прочности (Сычев М.М.).

Выстаивание литейной формы (форма как бы выпадает из поля зрения литейщиков) в течение времени не короче, чем требуется для самопроизвольного протекания указанных выше процессов после нанесения на ледяную модель сыпучего формовочного материала до создания твердой оболочки, позволяет литейщикам выполнять последующие действия с формой без нарушения ее целостности. После твердения формы ее освобождают от остатков жидких продуктов модели (если остались) и после дополнительного отверждения, высушивания оболочки или других известных операций могут отправлять на заливку металлом или, удалив из формы путем высыпания через низ контейнера остатка сыпучего формовочного материала, отправлять на склад для последующей заливки металлом с опорным наполнителем или без него.

Выстаивание песчаной формы без сотрясений и колебаний, обычно присущих транспортировке форм, в режиме относительной статичности форм (еще теоретически допустимо лишь прямолинейное движение с постоянной скоростью) создает условия перенесения опоры для сыпучего формовочного материала с ледяной модели, которая тает, на упрочняющуюся оболочку вокруг нее. Сохранение в статическом состоянии зерен формовочного материала вокруг тающей модели в виде стенок литейной полости, которая освобождается от модели, обеспечивают два нижеописанных способы, способствующие предотвращению обрушения песчинок с этих стенок.

Способ (пат. 82026 UA) нанесения сыпучего материала в виде порошкового покрытия на ледяную модель основан на использовании противоположных электрозарядов зерен этого покрытия и поверхности модели с удержанием слоя покрытия толщиной до 3 мм (обычно на вогнутых поверхностях), который для мелких моделей можно считать уже облицовкой и после его отверждения использовать как оболочковую форму. А способом (пат. 88304 UA) получали многослойное покрытие на модели из формовочного материала, которое затем отверждали в одном из вариантов в

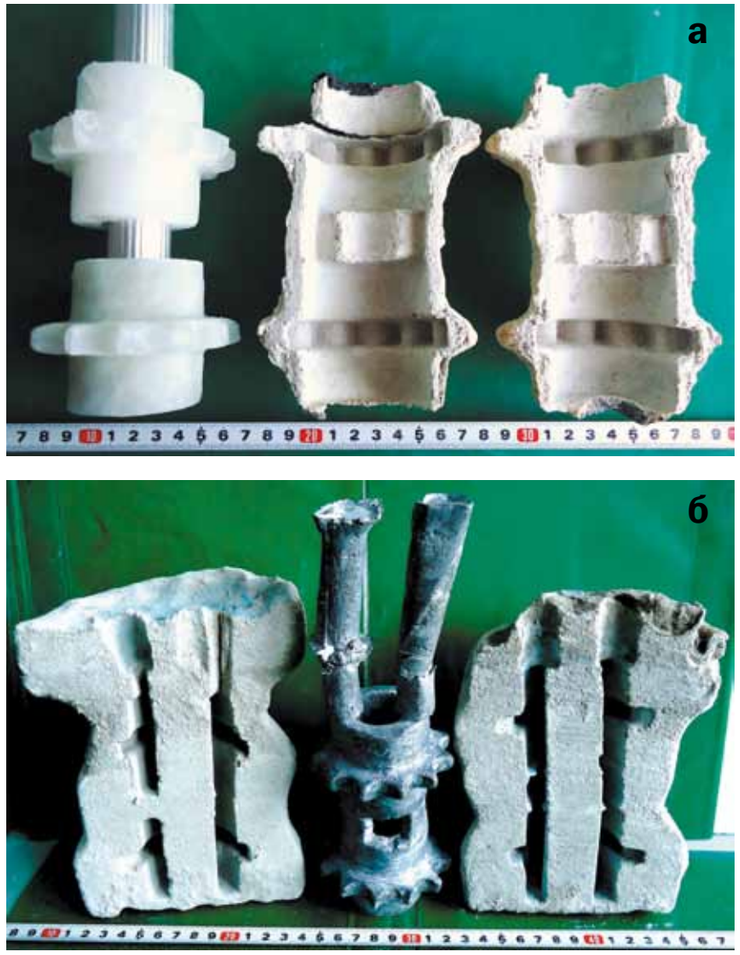




Рис. 2. Примеры из технологии литья по ледяным моделям: а), б) для детали «звездочка конвейера»; в) для модели «Мефистофель»

виде оболочковой формы. Последний способ состоит в поочередном нанесении сухого формовочного материала и помещения модели в увлажненную пульверизацией жидкости воздушную среду, с которой влага конденсировалась на охлажденном льдом модели формовочном материале, содержащем, например, гипс или цемент. В результате чего получали полутвердое покрытие, в котором начиналось схватывание этих вяжущих еще на твердой модели.

После нанесения на модель покрытия ее с покрытием помещали в контейнерную опоку и засыпали сухим формовочным материалом, в частности, по способу (пат. 81726 UA). Типовой пример состава засыпаемого материала приведен в патенте (83891 UA) с рекомендациями по его гранулометрической оптимизации по методике (пат. 83018 UA). Затем формовочный материал виброуплотняли. При этом формовочный материал обжимал и уплотнял покрытие.

Далее осуществляли выстаивание литейной формы на горизонтальной площадке для самопроизвольного протекания трех операций: плавления модели, фильтрации ее расплава в формовочный материал и создание в нем твердой оболочки песчаной формы. После виброуплотнения по оптимальному режиму песчинки формовочного материала перестраиваются так, что заклинивают друг друга, мешая взаимному перемещению. Это явление носит название «появление арочных структур» (Котов. В.). В арке каждый отдельный элемент не может переместиться в направлении действия внешней силы - он зажат враспор соседними элементами, которым передает действующую нагрузку, и приобретает свойства твердого тела, что позволяет в статическом состоянии достаточно тонкой твердеющего оболочке выдерживать вес верхних слоев сыпучего формовочного материала. Создание твердой оболочки формы достаточной прочности контролировали известными методами (пат. 74280 UA). Как правило выстаивание форм проводили в течение второй и третьей смен, работая на первой. На второй день отформованные изделия были достаточной прочности для дальнейших операций.

Следующий пример состоял в том, что для мелких моделей наносили на них в непрерывном режиме три слоя покрытия из сыпучего формовочного материала с применением увлажненного воздуха, помещали полученную оболочковую форму с моделью на противень и обеспечивали выстаивание такой литейной формы на гори-

зонтальной площадке. Модель таяла, жидкость от нее пропитывала оболочку с гидратационным вяжущим в формовочном материале. Твердением этого вяжущего получали оболочку песчаной формы. Избыток жидкости стекал в противень. Выделением достаточного времени для самопроизвольно протекающих операций достигали заданного результата.

Опробовали также изготовление песчаного стержня с полостью, выполненной по ледяной модели в его центральной части. Песчаные стержни с полостью или оболочковые стержни экономят формовочный материал, имеют высокие газопроницаемость, податливость и вибиваемость, что в идеале позволяет им полностью высыпаться из полостей отливок, разрушаясь от усадки охлаждаемой отливки. В процессе изготовления стержня на дно стержневого ящика засыпали слой сухого формовочного материала, вкладывали ледяную модель, которая по размерам соответствовала создаваемой в теле стержня полости, досыпали и виброуплотняли формовочный материал, заполняющий стержневой ящик. Помещали ящик с моделью на противень и выполняли выстаивание ящика со стержнем на горизонтальной площадке. Модель таяла, жидкость от нее пропитывала оболочку с гидратационным вяжущим в формовочном материале, твердением которого достигали создания твердой оболочки стержня. Избыток жидкости (при наличии) стекал в противень. Предоставлением достаточного времени для текущих в медленном темпе операций получали стержень с полостью. В случае необходимости в течение выстаивания возможно кантование ящика для равномерной фильтрации талой воды в стержнях сложной конфигурации. Жидкость с противня подавали на повторное применение.

В одном из вариантов при выстаивании литейной формы или стержня их подогревали до температуры 40...100 ° С путем установки формы или противня со стержневым ящиком на металлическую пластину, которую в лабораторном варианте снизу подогревали бытовой электроплитой. Мелкие формы помещали в камерное сушило. Для формовочного материала с гипсом форму в контейнерной опоке или противне нагревали до 40...46 ° С , а при формовочном материале с цементом - до 80...100 ° С.

Поскольку протекание процессов тердения в таких условиях определяется диффузионными явлениями, и повышение температуры увлажненного слоя формовочного материала на каждые 10% стимулирует сокращение набора контрольной прочности примерно в 1,2 раза, то при нагревании его до 80° С расчетное время достижения контрольной прочности сократится примерно в два раза. Но с учетом потерь тепла на таяние льда и постепенное нагревание до указанных температур формы или стержня достигали сокращения времени выстаивания в среднем на 30...60 %. Повышение температуры песчаных изделий стимулировало процессы их высушивания и сокращало эту операцию в дальнейшем.

Для заливки металлом полученных форм их могут дополнительно высушивать, вакуумировать при заливке, прокаливать, формуя в опорном наполнителе, или без. Возможность регулирования скорости формовочных процессов дает гибкость производству с оптимизацией его расходной составляющей. Но основная выгода заключается в замене процесса принудительной фильтрации с сопутствующими операциями, требующими энерго- и трудозатрат, специального оборудования, соблюдения достаточно строгих режимов их выполнения, на капиллярную самопроизвольную фильтрацию достаточной продолжительности в условиях «покоя» литейной формы или стержня.

На фото приведены примеры из технологии литья по ледяным моделям. На рис. 2, а) для детали «звездочка конвейера» показаны (слева направо) оболочковая форма, блок из двух ледяных моделей для получения такой оболочковой формы и такая же форма, распиленная пополам для контроля качества. На рис. 2, б) в центре показана металлическая отливка из двух звездочек и две половинки распиленной утолщенной песчаной формы.

На рис. 2, в) в центре показан «заводской» металлический барельеф «Мефистофель», с которого (справа от него) выполнен ледяной отпечаток в виде ледяной модели пресс-формы, а слева - ледяная модель этого барельефа, выполненная по этой ледяной пресс-форме как разовой оснастке. Для изготовления этой ледяной модели использовали то, что температура плавления льда растет при повышении концентрации поваренной соли в растворе; и ледяную пресс-форму из соленой воды можно расплавить при температуре ниже нуля (- 5...8° С), а контактирующая с ней модель из пресного льда сохранится. Это пример способа получения ледяных моделей по разовым ледяным пресс-формам, которые легко снять в виде ледяного отпечатка при копировании готовых, например, хрупких художественных изделий.

Возвращаясь к теме мониторинга литья по ледяным моделям как современному механизму оптимизации разновариантных процессов, еще слабо опробованных в производстве, подчеркнем важность одновременной отработки экоинновационной технологии литья с введением в этот процесс компьютерного мониторинга как инструмента, расширяющего человеческие возможности в выборе информации и принятии решений. Высокопроизводительные цифровые технологии, объедененные термином «Big Data», позволяют сегодня совместить огромные массивы данных, в частности, о воде как одном из самых распространенных веществ на нашей планете и ее взаимодействии в трех агрегатных состояниях с другими веществами, с мониторингом и последующей обработкой данных, непрерывно поступающих с измерительных устройств. Такие методы обработки данных огромных объёмов и значительного многообразия для получения воспринимаемых человеком результатов в условиях их непрерывного прироста, сформировавшиеся в конце 2000-х годов, выводят мониторинг за пределы «аналоговой эпохи» и позволяют выполнить в реальном времени такие приложения, как распознавание образов, кластеризация, регрессионный анализ, индуктивное моделирование, различного рода прогнозирование для успешной реализации новых производственных процессов. ■