

КОНЦЕПЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ЛИТЬЕ МЕТАЛЛА В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ

Создание технологии литья по ледяным моделям преследует цель получения экологически чистого производства. Разработанные способы состоят в том, что после таяния модели в песчаной форме получают полость, и заливаемый расплавленный металл контактирует с увлажнённым песком или со связанной оболочкой. Анализ вариантов изготовления песчаных форм по таким моделям показывает значительные возможности сочетания криотехнологии с традиционными видами формовки.

В соответствии с новым европейским законом о химкомпонентах и их выбросах, за выброс 1 т литейных отходов в Европе придётся заплатить ~ € 200, а за отходы с отклонением от нормы по содержанию вредных компонентов – ещё дороже. Ужесточение нормативов влияет на выбор литейной технологии. Во ФТИМС НАН Украины в настоящее время проводится цикл исследований по созданию концептуально связанного с ЛГМ (использующего те же пресс-формы для получения моделей и формовочную оснастку) нового экологически чистого способа производства металлических отливок по одноразовым моделям из льда как конструктивного или матричного материала с добавками или примесями. В статье, опубликованной в №? (?), мы рассказали о предпосылках возникновения способа получения песчаных форм по ледяным одноразовым моделям. Темой настоящей публикации является рассмотрение разработанных вариантов, новизна большинства из которых состоит в том, что продукты таяния модели могут частично или полностью впитываться в поровое пространство сухого песка формы [1, 2]. При опробовании этих способов формовки и разработке их до опытно-промышленного уровня исследователи столкнулись с множеством разноплановых явлений, мало или практически не рассмотренных в теории литейных процессов, слабо используемых в технологии песчаной формы и подлежащих исследованию и использованию.

Обширные знания о влаге и воде как «главной» жидкости планеты накоплены многими дисциплинами. При вовлечении их в технологию литья по ледяным моделям применимы основы гидромеханики, подземной гидравлики, механики сплошных (гетерогенных, пористых и сыпучих) сред, гляциологии и др. Методы физической (коллоидной) химии и поверхностных явлений, включая описание закономерностей сорбции при пропитке дисперсных сред, каким является формовочный материал, позволяют регулировать импрегнацию продуктов плавления модели в материал литейной формы под воздействием перепадов давления, температуры и концентрации. Методы термодинамики (в т.ч. неравновесных процессов) путём составления тепловых и материальных балансов с учётом фазовых изменений материалов позволят создать математические модели процессов [3].

Пожалуй, не найдётся в природе такой многовариантности соединений материалов с другими жидкостями, как с водой. По П. А. Ребиндеру, влага в материале может находиться в пяти видах: химической, адсорбционно, капиллярно, осмотически связанная и свободная вода, удерживаемая в дисперсной структуре и захваченная телом механически. Для большинства формовочных материалов два вида влаги – адсорбционная и капиллярная – являются основными. Кроме того, хотя бытует ошибочное мнение о том, что лёд – самое простое и понятное из веществ, в широкой области температур и давлений существуют 11 различных его фаз. Перенос влаги (массы) в формовочном материале вследствие наличия неоднородности температурного поля

и поля давления носит градиентный характер, описываемый уравнением Фика: $j = -D \text{grad} C$, где коэффициент D имеет смысл суммарной массопроводности реального капиллярно-пористого материала, C – массосодержание рассматриваемого компонента (вода, лёд, пар) в порах материала литейной формы [4].

В вакуумируемой литейной форме, чаще всего используемой для литья по ледяным моделям, явление теплопереноса сочетается с температурными изменениями при фазовых превращениях влаги, что взаимосвязано с массопереносом, а также усложняется влиянием поля давления на этот процесс. Процессам замораживания и таяния такой модели свойственны объёмные изменения материала, а операции нанесения сухих облицовок или присыпок на модель неизбежно сопровождаются увлажнением этих модельных покрытий путём их охлаждения при контакте со льдом модели ниже температуры точки росы окружающего воздуха и конденсации из него влаги [5]. Математическое описание нестационарного процесса теплопереноса в песке литейной формы с учётом фазовых превращений влаги обычно связано с получением аналитических решений ряда краевых задач тепло- и массопереноса при произвольных начальных распределениях потенциалов переноса от источников теплоты и массы на поверхности (или в объёме) литейной формы. При этом важно избегать громоздкости изложения, чтобы за буквами формул не потерять физический смысл, а решения не получить сложными в физическом понимании и инженерном обращении для технолога-литейщика.

Оценивая постепенное развитие ледяных технологий как один из шагов в завтрашний день промышленного производства с новым уровнем экологической культуры, отметим, что, по нашему убеждению, бум криотехнологий ещё только предвидится по сравнению с сегодняшним вниманием к нанотехнологиям (последний термин впервые введён в научный оборот в 1974 г.). Ещё в начале прошлого века польский геофизик А.Б. Добровольский в своей монографии «Естественная история льда» предложил называть отрасль науки, изучающую лёд во всех видах и проявлениях, криологией [6]. Но термин «криотехнология» пока распространён лишь среди медиков, пищевиков и создателей холодильной техники, а лёд как материал для изготовления промышленных конструкций ещё не нашёл широкого применения. Вовлечение криологии и упомянутых междисциплинарных знаний в литейное производство как технологического использования науки в качестве производительного ресурса неизбежно даст высокотехнологичные способы получения отливок.

Во ФТИМС разработка технологии получения песчаной формы по ледяной модели ведётся в таком направлении, что для формовки применяют сухой несвязанный песок аналогично вакуумно-плёночной формовке (ВПФ, V-process). Это обосновано, прежде всего, экологическими причинами, поскольку традиционно наличие связующего в отработанном удалённом в отвал песке и термодеструкция этого связующего с выделением

газов дают основные загрязнения по вине формы. Кроме того, наличие связующего повышает стоимость формы, усложняет уплотнение формовочного материала и его регенерацию.

ВПФ обычно связана с нанесением синтетической плёнки на модель. Для такой формовки, преимущественно в неразъёмной форме, разработан способ облицовки плёнкой модели при помощи действия воздушного давления на плёнку. Это давление используют в двух вариантах: пониженное или повышенное против атмосферного. Его поддерживают лишь короткий период – в процессе операции наложения плёнки в виде мешка, внутрь которого помещают модель, с последующим запаиванием (сварочным швом) при герметичной упаковке модели. Под действием остаточного разрежения в мешке плёнка плотно облепает модель и исключает контакт модели с воздухом цеха, в том числе при длительном складировании ледяной модели в камере холодильника. Это сохраняет качество модели, поскольку во время хранения неупакованной модели часто наблюдается заваливание её краёв по причине сублимации льда. Кроме того, эта плёнка служит изолятором при контакте модели с воздухом вне холодильника, что удлиняет допустимое время продолжительности технологических операций с моделью в атмосфере цеха, а также позволяет нанести пульверизатором поверх плёнки на модель быстросохнущую спиртовую огнеупорную краску, которая в контакте с льдом модели вызвала бы его местное оплавление.

После герметичной упаковки модели в запаиваемый мешок больше не требуется удерживания плёнки на модели с помощью вакуумного насоса на всех операциях её транспортирования, хранения, окраски поверх плёнки, формовки в песок. Это освобождает формовочные конвейеры от традиционного при ВПФ совмещения с оборудованием по упаковке моделей и синхронизации формовки с этой операцией, заранее упакованные модели можно со склада транспортным конвейером подавать на формовочный конвейер. После плавления и удаления модели в вакуумируемой форме синтетическая плёнка из упаковки модели становится характерным для ВПФ герметизатором песка формы, что далее сводит техпроцесс к известной тщательно отработанной технологии ВПФ и гарантирует стабильное качество отливок.

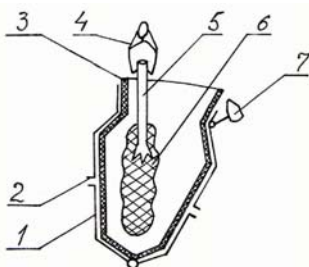


Рис. 1. Способ упаковки в синтетическую плёнку.

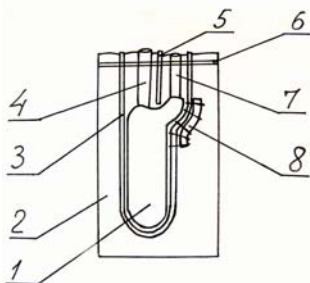


Рис. 2. Упакованная модель.

Вариант выполнения такой упаковки показан на рис. 1, где в разрезе изображён коробчатый подаватель 1 с одной или двумя подвижными стенками или шарнирно соединёнными створками, которые могут иметь штуцеры 2. Внутрь коробчатого подавателя помещён мешок из синтетической плёнки 3 (из полимерного материала, традиционного для ВПФ). А также заведена подвешенная на зажиме 4 за стояк 5 модель 6. К одной из створок закреплён паяльник 7 для выполнения сварочного шва отверстия мешка из плёнки 3.

Способ нанесения синтетической плёнки на модель осуществляют следующим образом (рис. 3). Прямоугольный мешок из синтетической плёнки 3 помещают внутрь открытого подавателя 1 и размещают плёнку вдоль стенок подавателя, оставляя мешок с открытым верхним отверстием. Для этого каждую из двух плёнок мешка крепят по периметру створок подавателя известными способами. Например, присасывают с помощью вакуума, приклеивают полоской липкой ленты, механическими прижимами и т. п. К штуцерам 2 может быть подведён вакуум для прижима плёнки к створке подавателя, а на створках могут быть закреплены нагреватели для нагрева плёнки мешка до температуры её пластического состояния.

В подаватель с открытым мешком помещают модель 6, закреплённую сверху зажимом 4 за стояк 5 литниковой системы, ленту из синтетической плёнки, вмонтированную в тело модели, либо другую подвеску. Модель стояка при этом может быть выполнена из пузырчатой плёнки в виде рулона требуемого диаметра, какие заморожены в лёд тела модели. Материалы синтетической плёнки мешка, трубок и подвесок модели выбираются такие, которые легко сплавляются в один сварочный шов. После подвешивания модели в полости подавателя створки его смыкают и одновременно создают перепад газового давления на внешней поверхности синтетической плёнки путём нагнетания газа под давлением через штуцеры 2. Это давление выдавливает из мешка воздух и прижимает плёнку мешка к модели. Сразу же за этим нагретым паяльником 7 выполняют сварочный шов впритык к закрытым створкам подавателя. Затем створки подавателя открывают и упакованную модель отправляют на склад. Подаваемое избыточное давление в пределах традиционного для литейных цехов значения до 600 кПа (6 кг/см²) может кратковременно создавать более плотный стык (касание) плёнки, влияющий на чёткость отпечатка модели в песчаной форме, чем традиционно применяемый вакуум для ВПФ в пределах до минус 80 кПа.

На рис. 2 показан результат упаковки с помощью вакуумирования, где в плане изображена модель 1, упакованная в мешок 2 из прозрачной синтетической плёнки, герметично заваренной по периметру мешка. В этом случае по периметру модели размещена гибкая пластиковая трубка 3 с внутренним диаметром порядка 3 - 30 мм в зависимости от величины модели. Упакованная модель 1 имеет стояк 4 и выпор 7 и может иметь дополнительную пластиковую трубку 5. Трубки 3 и 5, стояк и выпор выходят в верхнее отверстие (створ) мешка, оно герметично сварено швом 6, которым сплавлено всё, что в него попало. Для повторения сложных изгибов модели на трубке 3 может быть установлен каркас 8 (либо вставлен в неё), например, из жёсткой проволоки. Трубки 3 и 5 в местах, где они проходят вблизи модели, выполнены перфорированными, с отверстиями диаметром 0,5 - 5 мм. В зависимости от диаметра трубок, отверстия выполняют по оси, параллельной стыку плёнки.

Трубки 3 и 5 размещают на расстоянии 0 - 10 мм от поверхности модели, в зависимости от её величины и конфигурации. На пластиковую трубку смыкается присасываемая плёнка, эта трубка для сложных моделей с впадинами может размещаться не в плоскости, а формировать более сложную конфигурацию поверхности стыкования синтетической плёнки мешка, для чего форму изгиба этой трубки удерживают каркасом 8. После присасывания плёнки к модели подключением трубок 3 и 5 к вакуум-насосу и смыкания створок подавателя наносят сварочный шов, оставляя вокруг модели газовое разрежение в герметично закрытом мешке, и далее действуют аналогично первому случаю. Если ледяную модель в таком состоянии охладить в холодильнике, то в герметично закрытом мешке, за счёт охлаждения оставшегося воздуха, создаётся или усиливается газовое разрежение путём охлаждения газа (по закону Шарля для идеального газа) вокруг модели. Это усиливает прижатие к ней плёнки и повышает качество отпечатка в песчаной форме при последующей формовке.

Если упакованную модель формуют в контейнере, то её засыпают песком не выше сварочного шва плёнки, который затем обрезают, предпочтительно после начала вакуумирования формы как при ВПФ, проведя соответствующую традиционной технологии герметизацию формы. После таяния ледяной модели её выливают из полости формы либо откачивают через трубку, причём при наличии трубки вблизи модели для вакуумирования мешка имеют возможность удалить жидкий модельный материал путём откачивания по этой же трубке. Если модель в мешке растает при формовке в песке со связующим после набивки или отверждения формовочной смеси, то её жидкость легко вылить через стояк/выпор или откачать по трубке, не увлажнив форму, поскольку герметичная упаковка мешка служит водонепроницаемым разделителем формы от продуктов модели.

При формовке в парных опоках и выводе всех концов мешка за пределы внешнего контура опок по их разъёму концы мешка по периметру можно обрезать. Тем самым превратив мешок в два полотнища плёнки, которые при ВПФ служат герметизаторами лада двух полуформ, а при обычной формовке со связующим – разделительным слоем двух полуформ и защитой формы от влаги, если модель ледяная. По стыку этих двух полотнищ полуформы можно разнять и удалить модель. Это позволяет применять многоцветные модели, что удобно для ВПФ, когда мешок служит носителем двух полотнищ плёнки для покрытия вакуумируемых полуформ. В этом случае сокращаются затраты на вакуумируемую модельную оснастку из-за того, что в теле модели не надо выполнять проводящие вакуум каналы для присасывания плёнки к модели, и выгодно для моделей, требующих разъёма полуформ по поверхности сложной конфигурации. При расстыковке парных полуформ, при наличии трубок по периметру их можно использовать для подачи газа под давлением для облегчения расстыковки форм по полотнам плёнки. При этом трубки легко извлечь и использовать многократно, а отпечаток от них на форме удобно использовать для помещения в него шнурового уплотнителя стыка собранных полуформ, что также уменьшает брак при литье по причине протекания металла по разъёму формы.

Описанный способ упаковки в плёнку послужит защитой для художественных изделий, при формовке по ним копий ледяных моделей, от сублимации льда во время хранения и даст возможность надёжной их герметизации при формовке в вакуумируемой песчаной форме. Указанные варианты созда-

ния перепада газового давления позволят выбрать наиболее приемлемый способ для получения оттиска формы высокой чёткости и отливки высокого качества.

Кроме синтетической плёнки для герметизации поверхности формы при ВПФ также применяют жидкий герметизатор, который наносят на поверхность полости формы. Согласно ноу-хау ВПФ, перепад газового давления в полости и в толще песка формы удерживает песок в сжатом неподвижном состоянии. Однако идея применения в качестве такого герметизатора расплава модельной композиции непростая для реализации. Оказалось, что при таянии ледяная модель отходит от поверхности полости формы, уменьшаясь в объёме, и особенно в потолочных и вертикальных местах открываются для доступа воздуха и остаются мелкие (точечные) поры, которые поток воздуха вглубь вакуумированного песка быстро расширяет до эрозионных зон, что затем даёт бракованную поверхность отливки. Аналогия этого явления наблюдается при ВПФ. Если проколоть иглой плёнку вакуумированной формы, сразу под проколом образуется рыхлость песка, впадина или канавка, порой малозаметные для формовщика.

После проведения цикла экспериментов лучшие результаты показала технология, при которой жидкое герметизирующее покрытие с некоторым избытком подавали к поверхности модели перед созданием перепада давления на формовочный материал или одновременно с ним. Этим жидким герметизирующим покрытием (вместо плёнки) стал расплав ледяной модели или модельная композиция. Практика отработки технологии формовки по одноразовой модели в дисперсном формовочном материале позволила сформулировать следующие принципиальные критерии (ноу-хау) новой технологии: следует не только 1) твёрдую модель перевести в текучую (жидкую) путём расплавления или растворения с последующим освобождением от неё полости формы, 2) но и нанести герметизирующие покрытия или создать оболочку (корку) вокруг этой полости. Выполнить эти операции таким способом, чтобы 3) ни на мгновение не допустить как отсутствия свойственного ВПФ перепада давления на поверхности полости формы, так и 4) проникновения воздуха сквозь недостаточно загерметизированный песок, который, имея значительно более высокую чем жидкость проникающую способность в поры песка, наносит песчаной поверхности эрозии в виде трещин и раковин. Они при формовке в неразъёмной форме визуальны незаметны, однако становятся причиной создания указанных выше дефектов поверхности металлической отливки.

Выведение герметизирующей жидкости на верхнюю часть поверхности модели через отверстие трубчатого выпора (стояка) до начала вакуумирования песка и поддержание полости формы, полностью заполненной этой жидкостью, в период времени до момента прекращения впитывания её песком и перевода модели в жидкое состояние, надёжно герметизируют полость формы и исключают проникновение в песок потока воздуха. При вакуумировании формы сжатие (прессование) песка перепадом (градиентом) атмосферного и внутриформенного пониженного воздушного давления, как средством уплотнения и удержания в неподвижном виде сухого песка, действует на полость формы только через поверхность жидкости в течение времени выдержки и этим приводит к герметичному запечатыванию этой полости. А жидкость одновременно выполняет герметизацию этой полости двойко: покрытием и пропиткой тонкого слоя песка. При формовке эту жидкость заливали в канал выпора и тем самым не до-

пускали воздух до песчаной поверхности со стороны полости формы, что предотвращало эрозию последней.

Кроме того, указанное целостное состояние несвязанного песка, как показано ниже, возможно без применения вакуумирования формы, с заменой его гидростатическим давлением жидкости, что уменьшает трудо- и энергозатраты производства и расширяет область применения способа как формовки из песка без связующего или с минимальным его количеством.

В качестве примера осуществления такого способа формовки на рис. 3 в сечении показана одноразовая модель 1, которая выполнена, в частности, из льда и заформована в песке 2, его вакуумируют через пористое дно с полостью 3. Верхняя поверхность песка формы (контрлад) герметизируется синтетической плёнкой 4, а другие – стенками опок или контейнера (контуры их условно показаны линией, ограничивающей песок формы). Для упрощения примера выпор 5 может также служить стояком для заливки металла, или форма может иметь иной конструкции стояк (коллектор), который не попал в сечение. Если форма имела два отверстия (выпор и стояк), то герметизирующую жидкость подавали либо в оба, либо в один, а второй затыкали пробкой. Использовали в качестве герметизирующей жидкости модельную композицию – водный раствор 25% жидкого стекла плотностью 1,08 г/см³.

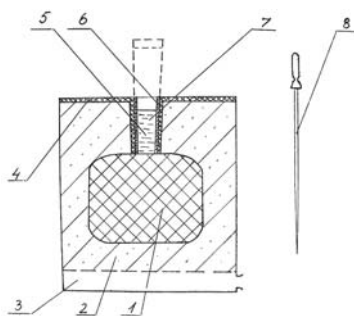


Рис. 3. Вакуумируемая песчаная форма.

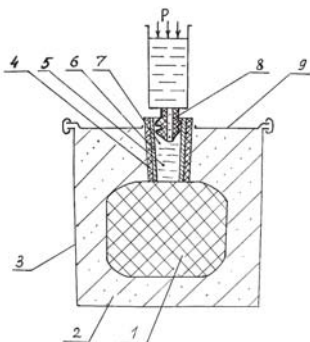


Рис. 4. Форма из песка без связующего.

Выпор и стояк выполняли полыми, их покрывали синтетической плёнкой 4, которую наносили на требуемого диаметра обечайки 6 из фольги или тонкой жести для сохранения трубчатой конфигурации после засыпки песка в опок. После заливания в выпор герметизирующей жидкости 7 показан её уровень в выпоре. Высота столба этой жидкости с гидростатическим давлением для удержания слоя невакуумированного песка показана пунктиром, при этом трубку выпора удлиняли. Для применения варианта удаления жидких продуктов из по-

лости формы через тонкие каналы в нижней части формы использовали шило 8, изображённое рядом с формой.

Второй пример применения способа герметизации пропиткой показан на рис. 4, где п.п. 1, 2 сохранены такими, как на рис. 3, в контейнерной форме 3 плёнкой 4 покрыта обечайка 6 выпора 5 с жидкостью 7. В отверстие выпора введён патрубок 8 с резиновым уплотнителем, по которому герметизирующую жидкость подают под давлением P. Контейнер формы плотно к песку покрыт крышкой 9 из жёсткого материала (стали), чтобы при значительном повышении давления P не произошло выдвигание вверх песка.

Формовку одноразовой модели выполняют подобно литью по газифицируемым моделям. На модель устанавливают или закрепляют известными способами трубчатый стояк и выпор 5 (или один из них как совмещённый вариант), песок виброуплотняют, герметизируют плёнкой 4 по контрладу или плотно закрывают крышкой 9. Затем заливают в трубчатый канал выпора и/или стояка герметизирующую жидкость и включают вакуумирование формы (рис. 3) либо вводят патрубок 8 и дают герметизирующую жидкость под давлением в форму под крышкой (рис. 4). Поскольку выпор чаще устанавливают на верхнюю часть отливки, то, прежде всего, в него удобно заливать эту жидкость.

Осуществление способа формовки основано на соблюдении того подтверждённого практикой принципа, что пока поверхность не загерметизирована нельзя начинать вакуумирование песка из-за эрозии песчаной поверхности потоками воздуха. Если вокруг модели в песчаной среде создан вакуум, а на поверхность жидкости через канал выпора действует атмосферное давление, то генерируемый таким образом перепад давления заставляет жидкость постепенно заполнять поры. При таянии ледяной модели твёрдая часть модели уменьшается, модельная и герметизирующая жидкости вместе продолжают герметизировать полость формы, передавая на её поверхность указанный перепад давления. За время таяния модели в течение нескольких минут поверхностный слой вокруг полости успевает надёжно пропитаться жидкостью без доступа воздуха со стороны контрлада. Затем жидкость удаляют из полости формы путём выливания при переворачивании формы на 180°, отсасыванием по трубке через отверстие выпора или через дно полости по наколам иглой сквозь загерметизированную оболочку одного или нескольких отверстий (диаметром 1,0 - 2,5 мм, глубиной 3 - 5 мм), по которым жидкость проходит через вакуумированный песок, частично испаряется и попадает в камеру 3. Удалённую жидкость процеживали, проверяли её плотность и использовали повторно.

После удаления жидкости форму заливают металлом, или, если для мелких отливок в результате указанных операций песок формы надёжно пропитан герметизатором и не осыпается в её полости, то отключают вакуумирование. После накопления достаточного количества форм на объём плавки формы вновь подключают к источнику вакуума и заливают металлом, а для совсем простых отливок возможен вариант заливки без вакуумирования. Готовую загерметизированную форму, хотя она и держит вакуум, нет необходимости лишнее время удерживать под вакуумом из соображений экономии энергии. Если даже в местах наколов образуются точечные горбики, как правило, в выступающих частях отливки, их затем зачищают.

Величину гидростатического давления герметизирующей жидкости для удержания в статике слоя невакуумированного

песка определяли так. Например, при соотношении объёмных весов кварцевого уплотнённого песка и воды как основы герметизирующей жидкости 1,6, высота её столба в полости выпора должна быть не менее чем в 1,6 раза больше толщины слоя песка, через который проходит выпор. Его трубчатую конструкцию соответственно удлиняли и создавали в ней такой столб (показано пунктиром на рис. 3). После таяния ледяной модели форму подключали к вакууму, жидкость удаляли указанным выше порядком и проводили заливку металла. Избыток трубчатого выпора или стояка можно срезать перед заливкой, или его сжигает расплав металла. Указанный вариант способа герметизации более «мягкий», поскольку даёт возможность создать минимально технологически возможный перепад давления на поверхность формы.

Применение избыточного давления P на герметизирующую жидкость на 50 ± 20 кПа выше атмосферного (рис. 4) даёт тот же эффект, что такой же величины разрежение в толще песка ниже атмосферного давления (рис. 3). В первом случае атмосферное давление сохраняется в толще песка, а во втором – снаружи песка. Обычно легче регулировать и поддерживать избыточное давление (чем разрежение), регулируя пропитку поверхностного слоя формы до уровня, достаточного для достижения её прочности и целостности, которые сохраняются после прекращения действия давления.

Для конкретного изготовления партии отливок на ледяные модели согласно способу [5] наносили сыпучие облицовки с небольшими добавками гипса, цемента, бентонита, крахмалита или других вяжущих. Также пригоден для формовки природный формовочный кварцевый песок (ГОСТ 2138-84) с глинистой составляющей (2 - 10%), полужирный (10 - 20%), жирный (20 - 30%) и очень жирный (30 - 50%), который, по сути, является природной песчано-глинистой смесью. При контакте со льдом и конденсировании влаги из воздуха в облицовке начинался процесс твердения (набухание глинистых частиц и др.) и образования корки (плёнки), который затем продолжался на протяжении от нескольких до десяти минут. За это время проводили засыпку песка в форму с моделью, уплотнение песка, герметизацию контрлада формы, заливку герметизатора в выпор и выдержку уровня жидкости выше уровня модели, придерживаясь указанного режима реализации способа. После засыпки и уплотнения песка в форме как герметизирующие жидкость применили чистую воду или воду с добавками, которые реагируют с облицовкой или иным образом способствуют герметизации аналогично способу [7].

За время таяния модели одновременно происходил процесс образования стабильного герметизированного слоя при частичном впитывании жидкости на глубину до 0,5...5,0 мм (для моделей до 1 кг) в песок, расход жидкости обычно в количестве до 10...15% компенсировали заливанием в выпор согласно конкретному технологическому процессу. Однако при таянии объём льда модели уменьшается на 9%, поэтому не меньше этого объёма жидкости заливали в выпор. В случае быстрого перевода модели в жидкое состояние в ряде случаев для тонкостенных моделей проводили дополнительную выдержку (0,5...3 минуты) до завершения процесса герметизации пропиткой перед удалением из полости формы жидких продуктов, хотя обычно этого не требуется. Применение такой выдержки позволяло варьировать материалами и операциями для оптимизации разновидностей этого способа с точки зрения материало- и трудозатрат.

В случаях перевода в жидкое состояние пенополистироловой модели в литейной форме такими жидкими растворителя-

ми, как живичный скипидар, другой органический растворитель или (лучше) жидкий раствор (5 - 10%) полистирола в скипидаре, которые одновременно служили растворителями и герметизаторами [8], придерживались той же обязательной последовательности. Сначала проводили герметизацию жидкостью полости формы в период перевода модели из твёрдого в жидкое состояние и только после образования надёжно загерметизированного состояния формы или зафиксированного поверхностного слоя её полости – контакт с воздухом полости формы. Также при необходимости вакуумировали форму в короткий период перед и во время заливки в неё расплава металла.

Следующими вариантами дальнейшего развития технологии формовки по ледяным моделям во ФТИМС выбрали направление получения оболочковых форм пропиткой сухого формовочного материала с применением быстротвердеющих связующих составов. Это направление начиналось с введения в формовочный песок материала, который твердеет при взаимодействии с талой водой от модели и создаёт прочную корку, например, полуводного гипса или цемента. Вода от тающей модели проникает в песок и отверждает его тонкий поверхностный слой. Однако указанные материалы имеют весьма ограниченное использование при изготовлении форм. Гипсовые смеси обладают низкой огнеупорностью и газопроницаемостью, а обе смеси, особенно цементные – большой длительностью твердения, что затрудняет их применение для литья по ледяным моделям. Обе смеси трудно регенерировать.

Из-за нагрева и таяния ледяной модели в контакте с воздухом цеха и формовочной смесью в процессе формовки требуется быстрое образование корки как оболочковой формы вокруг модели. Если этого не удавалось достичь, то неподвижного состояния стенки полости формы достигали применением вышеуказанного принципа жидкой герметизации, вакуумирования формы аналогично ВПФ и/или созданием гидростатического давления жидкой (модельной) композиции. Процесс связывания частиц формовочной смеси принято рассматривать как скрепление твёрдых тел жидким веществом (в нашем случае с последующим твердением), когда прочность связывания зависит от соотношения сил когезии и адгезии и их абсолютных величин. Технология изготовления форм, упрочняемых в контакте с оснасткой – холоднотвердеющих смесей (ХТС) или твердеющих под действием различных химических реагентов [9] – обладает большим количеством связующих композиций для получения прочной песчаной корки. В нашем случае использовали композиции из двух ингредиентов, входящих сначала отдельно в составы материалов модели и формы, а затем взаимодействующих друг с другом при пропитке модельным расплавом сыпучего формовочного материала формы. При этом один из пары ингредиентов являлся связующим формовочной смеси, а другой – отвердителем или катализатором отверждения этого связующего (как трактует современная теория литейных процессов). Если один вводили в модель, то другой – в песок, и наоборот. Отвердитель вступает в прямое или косвенное химическое взаимодействие со связующим, а катализатор обеспечивает отверждение связующего в результате изменения pH среды. Среди химических и физико-химических процессов отверждения при пропитке модельным расплавом поверхностного слоя песчаной формы и образовании твердеющей связующей композиции из пары ингредиентов преобладали процессы поликонденсации и полимеризации, реализующие

преимущественно химический тип связи между частицами формовочного песка.

В связи с потерей несущей способности тающей модели в контакте со стенкой формы выбирали составы ингредиентов для мгновенного (лучше всего) или наиболее быстрого твердения (с минимальным индукционным периодом). Это часто были такие пары ингредиентов, которые ранее забраковали разработчики ХТС по причине малой живучести смеси. Выбор ингредиентов и их количества (мас. ч.) обосновали тем условием, что продолжительность создания прочной корки должна составлять не более продолжительности расплавления модели. Иначе при более медленном твердении, как показала практика, в полости формы от потолочных частей формы возможно отделение песчинок или слоёв несвязанного песка и опускание их вниз в среде модельного расплава, что ведёт к браку формы. Кроме того, медленное твердение стимулирует излишне глубокую пропитку формы, что даёт перерасход модельно-формовочных составов часто с дорогостоящими ингредиентами, а также излишне увлажняет форму, что может увеличить время подсушки оболочки и в целом замедлит цикл формовки. Медленное твердение тормозит производственный процесс, ведёт к излишнему перерасходу ресурсов и снижает качество форм и отливок. А процесс создания прочной корки не дольше продолжительности расплавления модели позволяет сразу по окончании твердения удалить жидкие продукты модели из полости полученной оболочковой формы и передать её на следующую операцию подсушки или литья под вакуумом.

В первом примере пары ингредиентов в качестве вяжущего использовали жидкое стекло (содовое), второе после глины по объёму применения для формовки связующее, которое согласно ГОСТ 13078–81 выпускается с модулем 2,61–3,0 – низкомолекулярное и 3,01–3,5 – высокомолекулярное, в жидком виде с плотностью 1360 – 1500 кг/м³. В литейном производстве применяют жидкое стекло с модулем 2,0–3,1, однако в нашем случае при введении жидкого стекла в модельную композицию и выборе для него порошкового отвердителя учитывали, что чем выше модуль жидкого стекла, тем выше его степень полимеризации и тем больше скорость твердения. Отверждение жидкостекольных смесей чаще всего производят такими порошкообразными материалами, как феррохромовый шлак, нефелиновый шлак и др. Нефелиновый шлак, % основных компонентов: CaO – 54 – 58, SiO₂ – 28 – 32; Al₂O₃ – 2 – 4; Fe₂O₃ – 2 – 4, Na₂O+K₂O (побочный продукт производства глинозёма из нефелиновых руд) – 2 – 3. Феррохромовый шлак – саморассыпающийся шлак ферросплавного производства, содержащий более 70% двухкальциевого силиката, его состав, %: CaO – 48 – 54, SiO₂ – 20 – 30, Al₂O₃ – 4 – 8, MgO – 7 – 12, Cr₂O₃ – 2 – 12, FeO – 0,1 – 2.

Среди других порошковых отвердителей жидкого стекла, вводимых в формовочную смесь, известны кремний, ферросилиций 75%, силикофторид кальция и др., а такие материалы как гидроксид и хлорид кальция, силикофторид натрия и др. могут использоваться как в порошке в песчаной смеси, так и в водном растворе [9] модельной композиции. Жидкое стекло не теряет свойства при замораживании и размораживании. Его использовали в водном растворе модельной композиции в количестве 5 – 30% от массы воды, а порошковые отвердители вводили в облицовочный песчаный слой [5] или в единый формовочный материал при уменьшении (по возможности) толщины стенок формы до 5 – 15 мм. При реализации варианта способа с введением жидкого стекла в сухом порошке в песок

вводили в количестве 1 – 10% от массы песка, а соответствующее количество отвердителя для него вводили в модельную композицию.

В последнем случае можно применять сухой концентрат для скоростного приготовления жидкого стекла по ТУ 5743-001-31178039-2001 в виде порошкообразного материала (молотая силикат-глыба). Он поставляется в мешках для быстрого приготовления водных растворов жидкого стекла непосредственно на месте потребления путём добавления к расчётному количеству концентрата необходимого количества воды. Этот концентрат производитель контролирует по содержанию диоксида кремния (SiO₂), оксидов щелочных элементов (Na₂O, K₂O), их соотношению, характеризующему как силикатный модуль М, что удобно для расчётов жидких композиций. При получении оболочки по ледяной модели предпочтение следует отдавать содержащему калий жидкому стеклу, т.к. самотвердеющие смеси на его основе имеют повышенную скорость затвердевания и сохраняют свою активность к затвердеванию при низких температурах, что проверено при работе вне помещения в зимнее время.

При выборе следующей пары ингредиентов в качестве связующего опробовали лигносульфонаты (ЛСТ – побочные продукты при производстве целлюлозы из древесины сульфитным способом). Они занимают в литейном производстве четвёртое место после глины, жидкого стекла и синтетических смол. Являются очень дешёвыми и недефицитными органическими водными связующими, обеспечивающими хорошую выбиваемость форм, в том числе из ХТС. Согласно ГОСТ 13183-83 производятся ЛСТ марки А (жидкие, содержат сухих веществ не менее 47%, плотностью не менее 1230 кг/м³) и марки Т (твёрдые, более 76% сухих веществ); рН 20%-го раствора ЛСТ – не менее 4,4. Для оболочковых форм аналогично ХТС, отверждаемых хромовым или марганцевым ангидридом или другими соединениями с шестивалентным хромом, наиболее подходящими являются ЛСТ с кальциевым основанием. ЛСТ применяют в формовочных смесях в количестве 2 – 5% (иногда до 8%) в сочетании с глиной 2 – 3%, или природными формовочными глинистыми песками. В качестве добавок, вызывающих самотвердение смесей с ЛСТ, используют хромовый ангидрид Cr₂O₃, бихроматы натрия и калия и персульфат аммония в количестве от 0,2 до 0,7% от массы смеси. Если хромовый ангидрид вводят в модельную композицию, то используют водный раствор с плотностью не выше 1,3 г/см³, тогда ЛСТ в виде порошка вводят в облицовочный песчаный слой. А если ЛСТ вводят в модельную композицию, то обычно разбавляют водой до плотности не выше 1,17 – 1,20 г/см³, а порошкообразный отвердитель помещают в песчаный слой.

Третью группу ингредиентов выбрали по аналогии с технологией ХТС, в которой используется синтетическая смола и отвердитель (кислота). Процесс твердения синтетических смол связан с переводом полимеров с низкой молекулярной массой в полимеры с высокой молекулярной массой, такие процессы отверждения синтетических смол, в зависимости от структуры получаемых полимеров, называют полимеризацией или поликонденсацией. Смеси со смолами имеют преимущества по сравнению со смесями с другими связующими. Они заключаются в их высокой прочности при малом (1 – 2,5%) расходе связующего. Однако при этом, как правило, требуют качественных песков.

Для литья по ледяным моделям весьма перспективны водорастворимые фенолоформальдегидные смолы, например, СФЖ-30-13 и водоземulsionная смола СФЖ-301. Их можно

вводить в модельный состав в количестве порядка 2,5%, а в песчаной смеси иметь до 3% глины или применять недорогие глинистые пески и отверждать смесь катализатором ПТСК в составе этой песчаной смеси в количестве 0,6 - 1,5% [9]. Глина при этом адсорбирует низкомолекулярные фракции связующего, в результате чего повышается прочность оболочки. В качестве катализаторов отверждения наибольшее распространение получили бензосульфокислота (БСК) и ортофосфорная кислота (ОК). БСК $C_6H_5SO_3H$ поставляется в виде кристаллического продукта тёмно-серого цвета с относительной молекулярной массой 158,18. Эта кислота хорошо растворяется в воде, адсорбирует влагу из воздуха. Техническая БСК состоит из моносульфокислоты бензола – 98,4 - 98,6%; свободной H_2SO_4 – 1,2 - 1,4% и бензола – не более 0,2% (ТУ6-14-25-74). Катализаторами отверждения карбамидных смол служат органические (щавелевая, лимонная, уксусная) и неорганические (серная, соляная, фосфорная) кислоты, а также некоторые соли (хлористый аммоний, хлористый цинк). Щавелевая кислота может поставляться в порошке белого цвета (для применения в водном растворе обычно рекомендован 10% раствор), а паратулуолсульфокислота (ПТСК, $C_7H_8O_3S \cdot H_2O$) поставляется в виде белых кристаллов без запаха с растворимостью в воде 67 г/100 мл воды.

БСК в виде водного раствора обычно используется плотностью до 1,20 - 1,25 г/см³ в качестве катализатора для отверждения феноло-формальдегидных, фурило-феноло-формальдегидных и др. смол, а ОК в виде водного раствора плотностью до 1,20 - 1,55 г/см³ используется в качестве катализатора для отверждения смол карбаминофуранового класса. Для ускорения процесса отверждения песчано-смоляных лакированных смесей или смесей с порошкообразной смолой используют водный раствор соляной кислоты, а также катализаторы ЛСФ, АМ и др. Катализатор ЛСФ представляет собой концентрат сульфитно-спиртовой барды, подкисленной ортофосфорной кислотой, применяется при использовании смолы КФ-90. Для введения в песчаную смесь в порошкообразном виде перспективны некоторые смолы производственные согласно ГОСТ 18694-80 (смолы фенол-формальдегидные твёрдые), в частности, СФ-011, СФ-012, СФ-015, СФ-015М и др. согласно рекомендаций справочника [10], связующие фенольные порошкообразные типа СФП-011П по ТУ 6-05-1370-90 или по ТУ 2257-111-05015227-2006, а также некоторые твёрдые эпоксидные смолы согласно ГОСТ 10587-84 и смола фенолоформальдегидная твёрдая СФЖ-303 по ГОСТ 20907-75.

При применении твёрдых ингредиентов в порошковом виде их могут предварительно подвергать размолу, а количество выбирать в зависимости от требуемой скорости твердения корки оболочковой формы. Описанные способы получения оболочковой формы по ледяным моделям открывают перспективу использования новейших быстро отверждающих композиций для литейного производства. Они расширяют возможности использования льда как несущего или матричного материала для однократных литейных моделей (в том числе с различными примесями и добавками), которые подвергаются плавлению и частичному впитыванию в песок литейной формы.

Объединяет описанные способы формовки не только применение ледяной модели, но и важная роль вакуума. Если в первом описанном способе он служит уплотнителем загерметизированной плёнкой песка, то во втором способе удерживает на поверхности песка и впитывает в песок герметизирующую

жидкость, а в последних случаях способствует переносу одного из двух составляющих самотвердеющих связующих композиций через границу поверхности вглубь песчаной среды, содержащей второе составляющее этой композиции. Эти способы обладают новизной и значимостью в научно-техническом плане при создании экологически безопасных криотехнологий, поскольку, например, в способах введения в сухой песок формы для получения оболочки используется связующего на порядок меньше, чем для традиционных ХТС, а упомянутая формовка по облицованной плёнкой ледяной модели обходится вовсе без связующего.

Описанные концепции технологии литья по ледяным моделям относят её к наукоёмким высоким технологиям литейного производства и развивающимся криотехнологиям промышленности. Эта технология в какой-то мере заимствует черты всего круговорота воды на нашей планете, который является глобальной системой переноса, поддерживающей энерго- и экологический баланс всей Земли. Сейчас она проходит стадию патентования и активной исследовательской и технологической разработки одновременно с апробированием в литейном цехе, но по мере развития займёт свою нишу для производства точных мелких и средних металлических отливок, дополняя возможности литейного производства и кардинально повышая его экологическую культуру.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент Украины 80381 МПК В22С 9/02, В22С 7/00. Оpubл. 2007, Бюл. № 14. Способ изготовления отливок/О.И. Шинский, В.С. Дорошенко.
2. Дорошенко В.С. Предпосылки создания технологии литья по ледяным моделям в вакуумируемых формах/Металл и литьё Украины. 2009. № 4 - 5. С. 18 - 23.
3. Дорошенко В.С. Создание математической модели пропитки поверхностного слоя песка связующим при получении оболочковых форм/Процессы литья. 2008. № 5. С. 67 - 77.
4. Дорошенко В.С., Кравченко В.П. Взаимосвязанные процессы переноса в песчаной форме при литье по однократным моделям/Металл и литьё Украины. 2009. № 9. С. 15 - 18.
5. Патент Украины 88304 МПК В22С 7/00. Оpubл. 12.10.2009, Бюл. № 19. Способ нанесения покрытия на охлаждённую модель/О.И. Шинский, В.С. Дорошенко.
6. Dobrowolski A.B., 1920. Historia naturalna lodu. Warszawa: Wyd. Kasa im. Mianowskiego, 1923. 940 s.
7. Патент Украины 89664 МПК В22С 9/04 В22С 7/00. Оpubл. 25.02.2010, Бюл. № 4. Способ изготовления песчаных форм по моделям, поглощаемым песком формы/О.И. Шинский, В.С. Дорошенко.
8. Патент Украины 86634 МПК В22С 9/02, 9/04, 7/00. Оpubл. 2009, Бюл. № 9. Способ изготовления песчаных форм по моделям, поглощаемым песком формы/Шинский О.И., Дорошенко В.С.
9. Дорошенко С. П. и др. Формовочные материалы и смеси. К. Выща шк., 1990, 415 с.
10. Специальные способы литья: Справочник. Под ред. В.А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991, с. 169 - 171.

В. С. Дорошенко.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины.