



## Список литературы

1. Иванов В. В. Об объемно-напряженном состоянии вакуумно-пленочной формы // Литейн. пр-во. – 2005. – № 7. – С. 11-14.
2. Шинский О. И., Русаков П. В. Особенности гидросилового формирования отливок в песчаной форме, упрочняемой газовым разрежением // Металл и литье Украины. – 2008. – № 9. – С. 16-19.
3. Вербицкий В. И. Анализ эффективности встряхивающих формовочных машин путем имитационного моделирования // Литейн. пр-во. – 1985. – № 11. – С. 26-28.
4. Каменский В. В., Матвеев И. В. Газодинамические, физико-механические и фильтрационные процессы при пневмоимпульсном уплотнении формовочной смеси // Литейщик России. – 2003. – № 6. – С. 21-25.
5. Timoshenko S. Vibration Problems in Engineering. – New York: Van Nostrand Co., 1928. – 480 с.
6. Краснопольская Т. С. Акустический хаос порожденный эффектом Зоммерфельда // Акустичний вісник. – 2002. – Том. 5, № 3. – С. 35-45.
7. Русаков П. В. Способ виброформовки насыпных литейных форм с энергетическим отображением процесса дилатансии // Металл и литье Украины. – 2009. – № 4-5. – С. 12-17.
8. Найдек В. Л., Шинский О. И., Русаков П. В. Энергочастотное управление режимами вибрационной формовки // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 69-76.
9. Русаков П. В. Особенности моделирования виброформовочных машин с переменной присоединяемой массой // Там же. – 2009. – № 3. – С. 35-42.
10. Русаков П. В. Шинский О. И., Здохненко В. В. Модель ЛТС с синхронизированными по частоте вибрационными машинами // Там же. – 2010. – № 3. – С. 36-45.
11. Русаков П. В. Некоторые общие принципы дуального управления процессом виброформовки // Там же. – 2010. – № 4. – С. 36-45.

Поступила 07.02.2011

УДК 621.744

**В. С. Дорошенко, Ю. Н. Иванов, А. Г. Черныш**

Физико-технологический институт металлов сплавов НАН Украины, Киев

## **ФОРМИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЛИТЕЙНОЙ ЛЕДЯНОЙ МОДЕЛИ\***

*Состав и структура материала литейной одноразовой ледяной модели во многом определяют качество этой модели и полученной по ней отливки, поскольку этот материал в дальнейшем используют при изготовлении литейной песчаной формы. Поэтому важно понимать механизм и кинетику затвердевания льда при получении модели, распределение в нем примесей. Рассмотрены современные модели кристаллизации с учетом теории кластеров и фракталов, приведены примеры моделей.*

**Ключевые слова:** литейные ледяные модели, водная композиция, дендриты, кластеры, фракталы.

\*Работа выполнена под руководством О. И. Шинского при участии В. П. Кравченко

## Проблемы технологии формы

*Склад і структура матеріалу ливарної одноразової крижаної моделі багато в чому визначають якість цієї моделі і отриманого по ній виливка, оскільки цей матеріал у подальшому використовують при виготовленні ливарні піщаної форми. Тому важливо розуміти механізм і кінетику твердіння льоду при отриманні моделі, розподіл у ньому домішок. Розглянуто сучасні моделі кристалізації з урахуванням теорії кластерів і фракталів, наведені приклади моделей.*

**Ключові слова:** ливарні крижані моделі, водна композиція, кріотехнологія, дендрити, оболонкові форми, кластери, фрактали.

*The composition and structure of the material casting disposable ice pattern largely determine the quality of this pattern and obtained by casting her as the material for further use in the manufacture of foundry sand molds. It is therefore important to understand the mechanism and kinetics of solidification of ice in obtaining the pattern, the distribution of impurities. The modern model of crystallization in the light of the theory of clusters, and fractals, examples of models.*

**Keywords:** cryotechnology, casting ice pattern, water composition, dendrites, clusters, fractals, shell mold.

Разработка новых видов кріотехнологии для литейного производства дает возможность повысить его экологическую чистоту путем замены традиционных полимерных модельно-формовочных материалов замороженной водой. Литье по ледяным моделям (ЛЛМ), внедряясь с этой целью в область точного литья – ЛГМ и ЛВМ, в процессе разработки технологии изготовления моделей позволяет отметить некоторые характерные закономерности, которые свойственны явлениям кристаллизации и являются важными для создания качественных литейных моделей с разнообразными технологическими свойствами. Прозрачность льда давно используют для наблюдения структурообразования и строения дендритов при физическом моделировании процессов кристаллизации металлов, полимеров и т. п.

Для производства описанных в данной работе образцов ледяных моделей использовали чистую водопроводную воду, а также водную композицию с технологическими добавками (до 25 %) связующих с целью последующей частичной пропитки песка, образуемой вокруг ледяной модели литейной формы при ее таянии. В некоторых вариантах в материал модели или ее облицовку вводили мелкодисперсный бентонит или огнеупорный наполнитель – дистен-силлиманит с целью создания противогарных свойств поверхности этой песчаной формы. Подробности формовки описаны в работе [1]. В большинстве разрабатываемых разновидностях ЛЛМ одноразовые модели после помещения их в песок литейной формы подлежат плавлению с удалением избытка жидкости из полости формы, в том числе при частичном испарении подсушкой с помощью вакуумирования формы. Поэтому нет необходимости в их сильном охлаждении, вполне достаточно температуры  $-(15-20)^\circ\text{C}$ .

Анализ последних публикаций не выявил исследований структуры промышленных конструкций изо льда, однако аналогичные явления рассмотрены в структурной кріологии [2] и мерзловедении [3], которые изучают кристаллы льда преимущественно как материальную основу кріосферы нашей планеты. В связи с этим отметим, что оборот материала ледяных моделей с его таянием и частичным испарением на литейном участке в какой-то мере наполняет (подобно микрокопии) кругооборот воды в природе нашей планеты, который является глобальной системой переноса, поддерживающей энерго- и экологическую глобальную систему переноса, а также энерго- и экологический баланс всей Земли. Пожалуй, кроме воды не имеется других природных материалов, которые могут находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях в узком интервале температур  $+20- -20^\circ\text{C}$ .

В работе [3], которую считают классической в этой области, приведены эксперименты по замораживанию водонасыщенных образцов характерных типов грунтов, в частности, песка и бентонита. Методика состояла в том, что грунт замораживали в

пробирке, погруженной в замораживающую смесь с температурой  $-10^{\circ}\text{C}$  в сосуде Дюара. Температуру  $\theta$  охлаждения и замерзания грунта записывали на фотобумаге с помощью зеркального гальванометра (рис. 1).

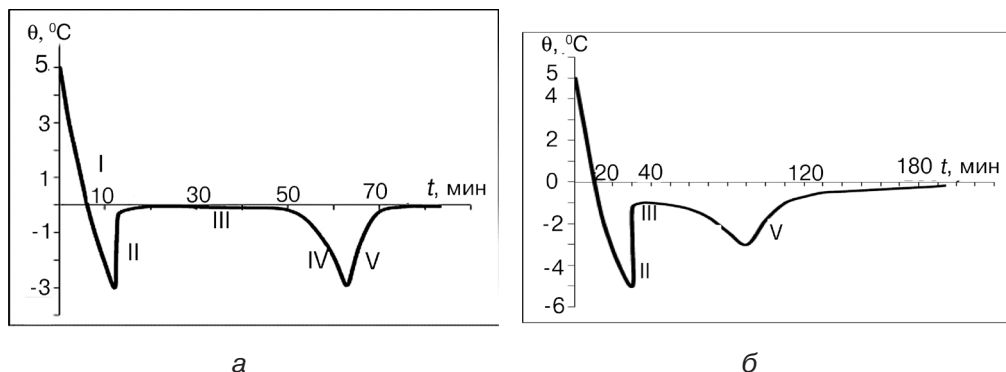


Рис. 1. Кривые охлаждения: а – песка влажностью  $W = 19,6\%$ ; б – дисперсной бентонитовой глины влажностью  $W = 80,5\%$

На рис. 1, а кривая замораживания водонасыщенного люберецкого кварцевого песка состоит из нескольких участков. Участок I соответствует только понижению температуры образца в процессе охлаждения и переохлаждения, наибольшая температура которого достигала  $\theta = -3^{\circ}\text{C}$ . В образце начинает замораживать вода и выделяется такое количество скрытой теплоты льдообразования, что температура грунта резко повышается до  $\sim 0^{\circ}\text{C}$  (участок II, рис. 1, а). При этой температуре в водонасыщенном образце замораживает вся свободная вода, причем время замораживания зависит от влажности композиции, интенсивности охлаждения и размеров образца. Далее следует участок со стабильной температурой на уровне  $0^{\circ}\text{C}$ , которая соответствует температуре замораживания грунта. Если продолжать замораживать образец, то через некоторое время температура его начнет понижаться по криволинейному закону. Выпуклость кривой к оси температур показывает, что на участке все еще продолжает выделяться скрытая теплота льдообразования и замораживает рыхлосвязанная (переменного фазового состава) вода. Однако при температуре ниже  $-1^{\circ}\text{C}$  охлаждение идет по прямолинейному закону (участок IV, рис. 1, а), состояние песка можно считать заморженным, то есть в нем практически вся вода перешла в лед. Температура (участок V) при повышении сначала изменяется прямолинейно, а затем криволинейно – скрытая теплота льдообразования начинает поглощаться, еще не достигнув температуры таяния образца.

Все сказанное относится и к глинистым образцам (рис. 1, б). Основное отличие состоит в том, что после температурного скачка устанавливается более низкая температура ( $-0,1$ - $2,5^{\circ}\text{C}$ ) и кривая участка стабилизации температуры выглядит покатой. Это вызвано явлением набухания (мицеллообразования) частиц глины, которое приводит к частичному связыванию воды, а также может быть следствием некоторого повышения концентрации солей в воде. Для криотехнологий литейного производства правомерна аналогия в том, что замораживание рассмотренных песчаных образцов можно сравнивать с процессами получения замороженной песчаной формы, а водонасыщенного глинистого образца – с получением ледяной модели при замораживании водной композиции в пресс-форме.

Для исследования процесса замораживания водной композиции на образцах значительно большей массы в условиях, свойственных опытному производству литейных моделей, в ФТИМС НАНУ провели измерения температуры при охлаждении образцов в воздушной среде внутри морозильной камеры с температурой  $-(15-17)^{\circ}\text{C}$ . В цилиндрическом сосуде диаметром 100 мм из гибкого тонкостенного пластика замораживали три вида образцов массой по 1 кг: из водопроводной воды, а также водные композиции с

связующими компонентами; 25 %-ный раствор жидкого натриевого стекла (плотностью 1,08 г/см<sup>3</sup>); 25 %-ный раствор декстрина (плотностью 0,98 г/см<sup>3</sup>). Температуру определяли в центре образца, начальная температура составляла +3 °С (рис. 2).

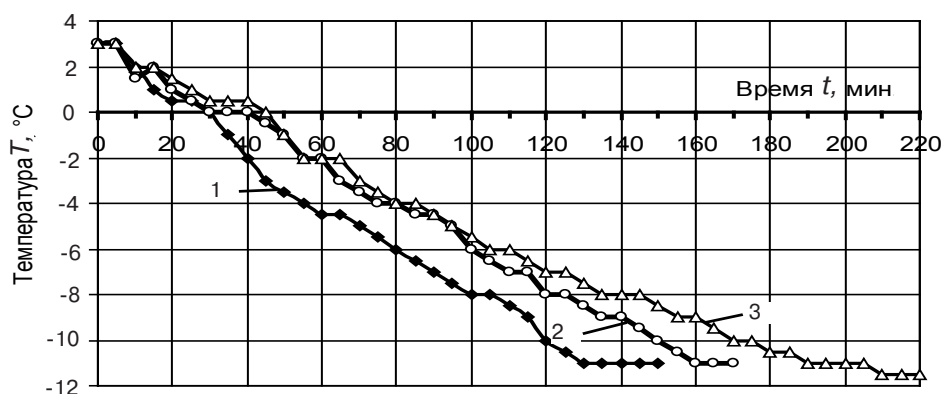


Рис. 2. Замораживание образцов водных композиций с различными компонентами: 1 – 25%-ное жидкое стекло, пл. 1,08; 2 – вода; 3 – 25%-ный декстрин, пл. 0,98

Анализ кривых показывает, что все три образца начали охлаждаться одновременно спустя 5 мин помещения их в морозильную камеру. Охлаждение жидкостекляной композиции шло несколько быстрее двух других из-за повышенной теплопроводности. На графике видно, что постепенное понижение температуры сменяется небольшими горизонтальными участками. Первые «полки» кривых слева вблизи 0 °С связаны с переходом воды из жидкого состояния в твердое, при котором происходит выделение скрытой теплоты льдообразования. Поскольку в центре образца жидкость замерзала в последнюю очередь, то ее температура до замерзания фиксировалась на доли градуса выше 0 °С. Некоторое нарушение плавного хода кривых, если это отражалось на них синхронно, в данной работе связывают с периодичностью включения-выключения компрессора камеры, с процессами внутри растворов либо погрешностью измерений. Полученные зависимости показали, что композиция с добавкой жидкого стекла закристаллизовалась за 30-32 мин, что быстрее двух других, которые затвердели примерно в одно и то же время (40-45 мин). Энергозатраты морозильника Nord-155 объемом 200 л при часовом расходе электроэнергии не более 0,06 кВт·ч с целью поддержания температуры в камере до -18 °С при охлаждении 1 кг льда до измеренной температуры (-11-12) °С за 3 ч составляют не более 0,18 кВт·ч. Для литья железоуглеродистых сплавов – 25,7 кВт·ч на 1 т отливок, что можно сравнить с данными В. С. Грузмана (59,5 кВт·ч на 1 т стальных отливок) при литье в замороженную форму, охлажденную до -30 °С, а также можно использовать для расчета производительности морозильных камер при получении моделей в опытном производстве.

С целью моделирования процесса кристаллизации водного раствора при получении ледяной модели напомним некоторые известные положения, рассмотренные подробнее в работах [2, 4, 5]. Этот процесс начинается с выделения из переохлажденного раствора зародышей кристаллов, и последующая кристаллизация протекает при дальнейшем охлаждении раствора на образовавшихся зародышах. Получение в процессе кристаллизации крупных кристаллов свидетельствует, что количество зародышей, образующихся в первый момент, было относительно небольшим, поскольку распределение вновь выделяющихся кристаллов при охлаждении раствора на большом числе зародышей приводит к образованию мелких кристаллов. Чем выше скорость охлаждения, тем больше таких кристаллических зародышей образуется в растворе и тем меньшим будет размер образовавшихся кристаллов.

Скорость роста кристаллов  $V$  (г/с) на образовавшихся центрах кристаллизации И. И. Андреев [5] предложил определять уравнением

$$V = dx/dt = kS(x - x'),$$

где  $dx/dt$  – количество вещества, закристаллизовавшегося в единицу времени;  $k$  – коэффициент, зависящий от диффузии молекул, достигших температуры затвердевания ( $d$ ) и средней длины диффузионного пути ( $\delta$ );  $k = d/\delta$ ;  $S$  – поверхность выделившейся твердой фазы;  $x$  – концентрация переохлажденного раствора;  $x'$  – растворимость зародышей кристаллов при данной степени их дисперсности.

Механизм возникновения роста кристаллов льда в воде наиболее адекватно отражает кластерная модель, предложенная Х. Фрэнком и В. Уэном в 1957 г. [2]. Согласно этой модели, жидкая вода является конгломератом крупных ассоциатов молекул  $H_2O$  (кластеров), возникающих и вновь распадающихся. Представление о льдоподобном строении таких «мерцающих» кластеров основано на рентгеновских и инфракрасных исследованиях воды, которые показали, что расположение молекул внутри кластеров похоже на расположение их в кристаллической решетке льда. Понижение температуры приводит к увеличению молекул в кластере. При температуре  $65^\circ C$  среднее число молекул в кластере составляет 15-50 ед., при  $0^\circ C$  – 90-120 и достигает 150-180 ед. при температуре  $-20^\circ C$  (Голубев, 1999). Таким образом, по этой модели еще до формирования первых устойчивых кристаллов льда (рис. 3, а) в воде существуют льдоподобные образования [2].

Рост кристаллов льда происходит не постоянно как результат отложения на гранях отдельных молекул, а скачками, за счет присоединения отдельных блоков

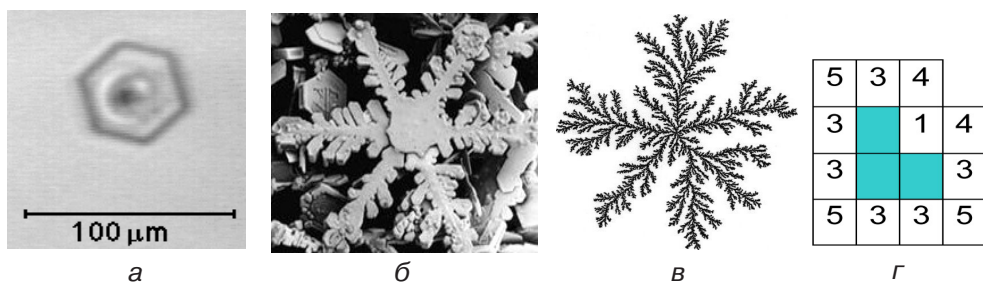


Рис. 3. Кристаллические структуры и описывающие их модели: а – микрофотоснимок гексагонального кристалла льда, выросшего из зародыша [2]; б – снежинка под микроскопом [2]; в – кластер в модели ДОА [5]; г – схема кластера из трех частиц с указанием вероятности прикрепления частицы к кластеру [5]

размером примерно  $10^{-7}$ - $10^{-3}$  см. Это вызывает в отдельных микроблоках изменение кристаллографических осей  $\langle C \rangle$  и  $\langle a \rangle$  на несколько угловых минут и даже градусов. В кристаллах, образующихся в условиях переохлаждения до  $-10^\circ C$ , разориентация отдельных блоков достигает 1-3 угловых градусов, а при малых переохлаждениях такая разориентация не превышает долей градуса. Механизм кластерного роста, однако, не исключает возможности присоединения к растущей грани кристалла отдельных молекул, хотя такой процесс, очевидно, является второстепенным, особенно в случае значительных переохлаждений воды. Рост кристалла может происходить не только в растворе, но и в газовой среде, при этом молекулы воды из пара осаждаются на лед, образуя, например, природу снежинки (рис. 3, б).

В работе [4] приведено выражение Б. В. Дерягина для расчета потока массы растущего льда. Скорость роста кристалла льда определяется скоростью притока



вещества или скоростью отвода теплоты кристаллизации. На основе анализа кинетики взаимодействия фаз в области границы фазовых переходов С. Е. Гречищевым получили следующее выражение [2]:

$$v_w d(Cq_w) = -Q \frac{dT}{T} - v_{ice} dG^{sk} - (v_{ice} - v_w) dP,$$

где  $v_w$  и  $v_{ice}$  – удельные объемы соответственно пленки воды и льда;  $q_w$  – поток влаги;  $C$  – коэффициент;  $G^{sk}$  и  $P$  – давление соответственно во льду и водяной пленке. Видно сходство этих двух выражений.

В последних работах по моделированию кластеры стали описывать как фракталы [4, 5], а кластеризацию рассматривать как один из способов возникновения фракталов в необратимых процессах. Среди таких работ наглядностью отличается модель ограниченной диффузией агрегации (ДОО – так названа в первоисточнике) Сандера для изучения эффектов нелокального поля диффузии [6]. Неупорядоченный, хаотический рост кристалла, отождествляемый с ДОО, доведенной до конечного предела, является следствием движения случайно блуждающих частиц к кластеру, что порождает фрактальные структуры.

Одним из экспериментальных примеров, подтверждающих адекватность ДОО, является электролитическое осаждение металлов на небольшой электрод. В целях большей наглядности обычно строят сначала двумерную модель кристаллизации вида «частица-кластер», а затем – более сложную модель «кластер-кластер» [5]. При этом допускают, что скорость охлаждения достаточно высокая, чтобы пренебречь упомянутой растворимостью  $x'$  образовавшихся зародышей кристаллов при данной степени их дисперсности. Такое же допущение соблюдают при построении и трехмерной модели, которую уже сравнивают с экспериментами. Моделирование «частица-кластер» на квадратной решетке размером  $L \times L$ ,  $L = 10 \div 1000$  ед. выполняют при соблюдении трех правил: 1 – первоначально имеется единственный точечный зародыш, который представляет собой центральную клетку решетки; 2 – частица определяется как квадратная клетка с единичной стороной, которая стартует из случайной клетки на краю решетки и совершает случайное блуждание по решетке до тех пор, пока не соприкоснется с одной из частиц кластера или группы соседствующих частиц; 3 – процесс прекращается, как только кластер достигает в своем росте края решетки. Правило 1 моделирует рост только одного кластера; 2 – допускает только древовидные кластеры без появления петель; 3 – останавливает численное моделирование.

Воспроизведение дендритного роста показано на модели ДОО с одной затравочной частицей в центре квадратной решетки (рис. 3, в). При этом присоединение частицы может быть слабым (одна-единственная связь с кластером), средним (2 связи) и сильным (3 связи). Число связей определяют как число вершин частицы, которые соприкасаются с кластером. Легко доказать, что в этой модели оно не может превышать 3.

Фрактальную размерность  $D_0$  (ее еще называют клеточной размерностью) множества  $X$  численно определяют следующим образом. Покрывают  $X$  квадратной решеткой, у которой сторона клетки равна  $\epsilon$ , затем подсчитывают число  $N(\epsilon)$  клеток, покрывающих  $X$ . Тогда по определению

$$\dim_M X = D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon^{-1}}.$$

Для двумерного случая фрактальная размерность дендритов близка к 1,7. Это означает, что масса агрегата возрастает как  $L^{1.7}$ , где  $L$  — линейный размер, а сред-

няя плотность изменяется как  $L^{1.7}/L^2 = L^{-0.3}$ , то есть убывает в полном соответствии с внешним видом подобных форм роста. В трехмерной ДОО фрактальная размерность обычно находится вблизи 2,5.

При ДОО отдельные частицы после некоторых случайных блужданий оседают на агрегате, порождая фракталы, которые моделируют рост ледяных дендритов в воде. Для них характерна древовидная структура с многочисленными «фьордами» на многих размерных масштабах, что также сравнимо с конструкцией снежинки (рис. 3, б, в) с учетом гексагональной тенденции, связанной со строением молекулы воды. Причина образования подобных структур при ДОО заключается в том, что блуждающая частица оседает, как правило, вблизи выступа фрактала, а не в глубине фьорда, как подробнее показано ниже.

Для вычисления вероятности прикрепления частицы к кластеру заметим, что частица, будучи квадратом, может иметь с кластером одну, две или три общих вершины. На рис. 3, г изображен кластер из трех частиц – клеток, окрашенных в темный цвет. Блуждающая частица может присоединиться к этому кластеру, попав в одну из 12-ти белых клеток. Число одношаговых путей, по которым частица может попасть в белую клетку, записано внутри клетки. Среди 12-ти белых клеток имеется 5 угловых, 6 срединных, 1 фьорд.

Угловые клетки имеют 1 связь с кластером, срединные – 2, фьорд – 3. Поскольку всего имеется 42 одношаговых маршрута, ведущих в белые клетки извне, то вероятности  $p_k$  того, что частица попадет в белую клетку с  $k$  связями, равны:  $p_1 = 23/42 \approx 0,5476$ ;  $p_2 = 12/42 \approx 0,4286$ ;  $p_3 = 1/42 \approx 0,0238$ .

Видно, что соединиться с кластером внутри фьорда у частицы мало шансов. Это означает, что при реальной кристаллизации внутри фьорда концентрация частиц льда меньше, так как многие из них уже присоединились к кластеру. В окрестности же выступов концентрация высокая, так как пока мало частиц из этой окрестности присоединились к дендриту. Сходство между конструкциями ледяных дендритов и формами ДОО объясняется тем, что оба процесса описываются уравнением Лапласа из теории потенциала, причем градиент потенциала соответствует полю диффузии в ДОО, а поверхность кластера ДОО — эквипотенциальной поверхности. При таком подходе к ДОО следует, что частицы будут с большей вероятностью прилипнуть к тем местам кластера, где градиент потенциала высокий, то есть вблизи выступов. «Рост» молнии или ледяного дендрита происходит, как правило, в направлении наибольшего градиента потенциала. Глубокие же фьорды (рис. 3, б, в) хорошо экранированы и поэтому либо растут очень медленно, либо не растут вообще. Такое соответствие между теорией потенциала и описанным механизмом фрактального роста кристаллов было полностью подтверждено тщательными измерениями и численными решениями потенциального уравнения.

Формы ледяных кристаллов, нарастающие в растворах на твердом основании, которым в нашем случае является стенка пресс-формы, своеобразны. При толщинах стенок ледяных моделей порядка 10 мм и замораживании в условиях холодильной камеры Nord-155 при указанных выше температурах скорости охлаждения достаточно высокие и дендритная структура, показанная в работе [4], возможна лишь в центре стенки модели в редком случае. Обычно оси кристаллов второго и третьего порядка перестают образовываться и возникают игольчатые (полосчатые) формы (рис. 4, а) кристаллов льда, которые нарастают на подложку преимущественно главной осью по нормали к основанию (по так называемому закону Бэртэна [2]) в условиях теплоотдачи в этом направлении, когда переохлаждение в стадию протокристаллизации ограничено более или менее тонким слоем воды, прилегающим к основанию. Чем тоньше переохлажденный слой в момент зарождения кристаллов, тем однообразнее ориентировка. Такое же полосчатое строение кристаллов льда видно в результате кристаллизации из воды с примесями частичек древесного угля,

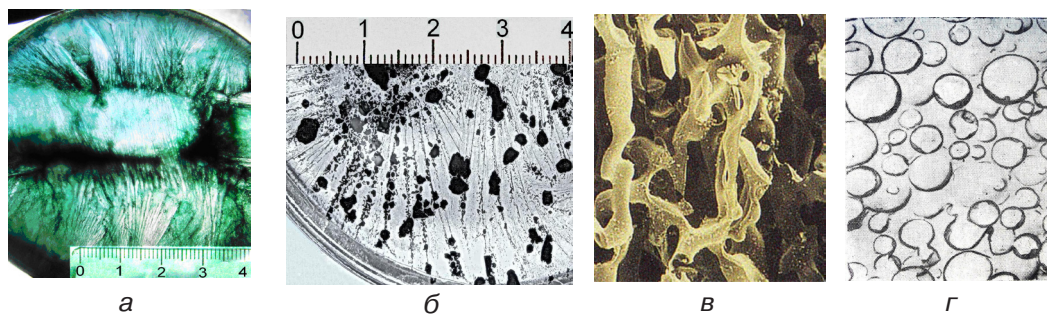


Рис. 4. Ледяные образцы: а, б – модель толщиной 10 мм; а – лед с добавками чернил; б – с добавками крупинок древесного угля; в – морской лед; г – электронно-микроскопический снимок скола замороженной эмульсии

которые располагаются через более или менее равные промежутки в тонких прослойках между плоскостями кристаллов (рис. 4, б).

Если в состав ледяной модели вводят растворенные или эмульгированные технологические добавки, например связующего, для получения в последующем оболочковой литейной формы путем пропитки контактного слоя песка при таянии этой модели, то характер распределения таких примесей иллюстрирует рис. 4 в, г. На рис. 4, в показан лед морской воды [2]. В процессе охлаждения раствора происходит раздельное формирование решеток льда и у каждой из солей. При этом расслаивается раствор-расплав, причем соли вытесняются к периферии области роста зародыша, а затем и кристалла льда. Вокруг кристаллов образуются как бы «клетки» и «каналы» из ячеек раствора повышенной концентрации. Минеральные примеси и растворенные соли в ходе роста распределяются между элементарными пластинками внутри кристаллов и между ними. В соленом льде рассол образует прослойки в базисных плоскостях кристаллов, разделяющих кристаллы на ряд пластинок. Чем быстрее происходит кристаллизация и чем больше концентрация солей, тем толще прослойки рассола (до нескольких миллиметров при близкой к нулю температуре) и тем тоньше относительно разделяемые ими элементарные пластинки льда. Чем больше концентрация примесей в растворе, тем меньше расстояние между соседними прослойками включений в кристалле.

На рис. 4, г показан электронно-микроскопический снимок скола замороженной эмульсии типа «вода в масле», образующейся при введении воды в расплав полиуретанового мономера [7]. При таком процессе размер частиц диспергированного полиуретанового латекса составляет 0,03–500 мкм. Достижения в технологии вододисперсионных лаков и смол, основанные на успехах в области эмульсионной полимеризации, а также в исследованиях коллоидно-химических свойств полимерных дисперсий и механизма пленкообразования, позволили получить ряд новых вододисперсионных связующих материалов, пригодных для замораживания в литейных ледяных моделях. Ученым-литейщикам еще предстоит отработать технологии применения этих связующих для получения оболочковых форм вокруг таких моделей, в том числе в паре с быстродействующими отвердителями. Ряд примеров изготовления таких ледяных моделей показан на рис. 5: а – представлены ледяные модели (одна с элементами литниковой системы) из технической воды; б – модель из вышеупомянутого 25 %-ного раствора жидкого стекла (в сборе с литниковой системой), а также полученная отливка из чугуна СЧ 20; в – ледяная модель из водного раствора лигносульфонатов технических (ЛСТ) и две отливки из цветных сплавов.

ЛСТ (ГОСТ 13183–83) являются дешевыми и недефицитными органическими водными связующими, обеспечивающими хорошую выбиваемость форм, в том числе из ХТС. Запланирована отработка технологии получения оболочковых форм, отверждаемых (по аналогии с ХТС) хромовым ангидридом  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  или другими соединениями с шестивалентным хромом в количестве 0,3–0,7 % от массы смеси. ЛСТ



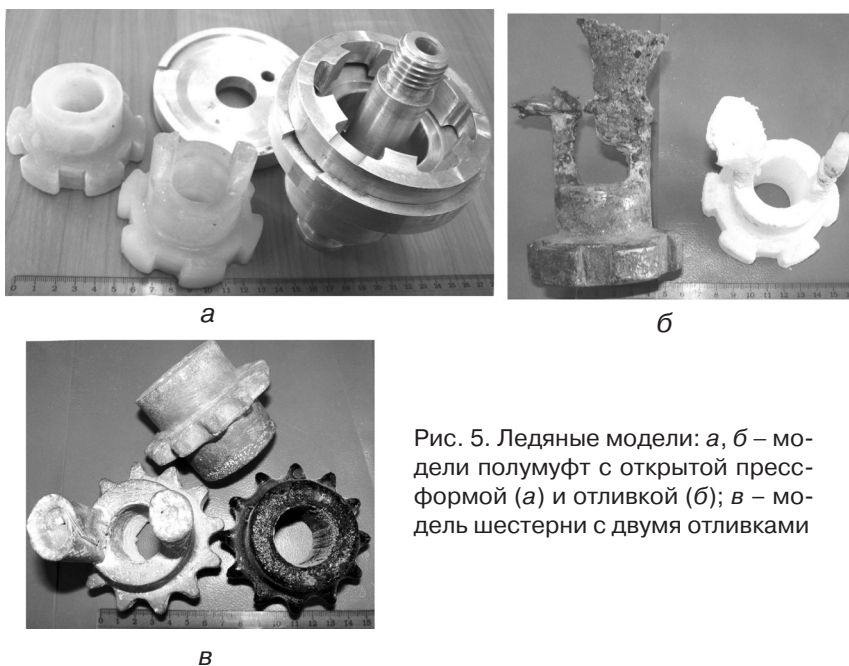


Рис. 5. Ледяные модели: а, б – модели полумуфт с открытой пресс-формой (а) и отливкой (б); в – модель шестерни с двумя отливками

применяют в формовочных смесях в количестве 3-5 % (реже до 8 %) в сочетании с глиной (2-3 %), или природными формовочными глинистыми песками. ЛСТ при введении в модельную композицию разбавляют водой до плотности не выше 1,17-1,20 г/см<sup>3</sup>, температуру модели понижают до -(17-20) °С, а порошкообразный отвердитель помещают в облицовочный песчаный слой.

При введении в материал ледяных моделей органических связующих уместно учитывать возможность проявления механизма действия биологических криопротекторов. В медицинской и лабораторной практике используют около десятка таких соединений, действующих аналогично белкам, предотвращающим кристаллизацию льда в клеточном растворе. Считается, что они адсорбируются на поверхности ледяного кристалла и тем самым препятствуют его росту, что наблюдается на полученных нами образцах с декстрином в виде мелкозернистой структуры, а на некоторых образцах, полученных в одинаковых условиях с образцом (рис. 4, а, зерна видны невооруженным глазом), сетка межзерновых границ была столь мелкой, что без увеличения не просматривалась.

В статье рассмотрен комплекс вопросов, касающихся механизма и кинетики затвердевания льда при получении одноразовой литейной модели, распределения во льде примесей. На примере исследования этого процесса показано применение современных математических методов наглядного моделирования кристаллизации с учетом теории кластеров и фракталов, приведены примеры литейных моделей и их структур. С помощью физической составляющей моделирования можно ответить на исследовательский вопрос, как происходит рост ледяных образований во время формирования модели, математическая составляющая дает возможность построить и изучить численную модель, дающую представление о механизмах и причинах роста кристаллов. С дидактической точки зрения для технологического использования важны аспекты адекватной интерпретации достигнутых результатов в терминах физической модели, некоторые полученные численные характеристики, а также предложенные направления исследований по доведению технологии ЛЛМ до опытного, а затем промышленного применения.



Список литературы

1. Дорошенко В. С. Предпосылки создания технологии литья по ледяным моделям в вакуумируемых формах // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 4-5. – С. 18-23.
2. Хименков А. Н., Брушков А. В. Введение в структурную криологию. – М.: Наука, 2006. – 279 с.
3. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высш. шк., 1973. – С. 28-32.
4. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Структура литейной ледяной модели с точки зрения теории фракталов // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 3. – С. 33-37.
5. Осташков В. Н., Скоробогатов Н. В. Наглядное моделирование дендритных структур // *Нефтегазовое дело*. – 2006. – № 3. – С. 7-13.
6. Сандер Л. Континуальная ДОА: случайный фрактальный рост, порождаемый детерминистической моделью // *Фракталы в физике*. – М.: Мир, 1988. – С. 336-344.
7. Толмачев И. А., Верхованцев В. В. Новые вододисперсионные краски. – Л.: Химия, 1979. – 142 с.

Поступила 7.04.2011

**ВНИМАНИЕ!**

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 4000 грн.

**Расценки на размещение рекламы  
(цены приведены в гривнях)**

| Размещение                                       | Рекламная площадь | Стоимость, грн. |
|--|-------------------|-----------------|
| <b>Рекламные блоки в текстовой части журнала</b> |                   |                 |
| Цветные  | 1/2 страницы      | 900             |
|  | 1/3 страницы      | 600             |
|  | 1/4 страницы      | 300             |
| Черно-белые                                      | 1/2 страницы      | 550             |
|  | 1/3 страницы      | 380             |
|  | 1/4 страницы      | 200             |
| <b>Цветная реклама на обложке</b>                |                   |                 |
| Третья страница обложки                          | 1 страница        | 2800            |
|  | 1/2 страницы      | 1400            |
|  | 1/4 страницы      | 700             |
| Четвертая страница обложки                       | 1 страница        | 3100            |
|  | 1/2 страницы      | 1550            |
|  | 1/3 страницы      | 1000            |

**При повторном размещении рекламы - скидка 15 %**

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

**телефоны: (044) 424-12-50, 424-04-10, 424-34-50**

**факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua**