
В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

УДК 621.74

**В. З. Тыднюк, О. И. Шинский, В. П. Кравченко,
В. С. Дорошенко, И.О. Шинский**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

КВАНТОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА. Сообщение 2*

Предложена физико-математическая модель теплообмена, которая учитывает квантовые особенности теплопередачи в жидкой и твердой фазах отливок. В частности, квантовое комбинированное рассеивание тепловых фононов и фотонов, а также дисперсию в оптической и акустической ветвях теплового потока. На основе модели рассмотрены особенности кристаллизации и классификация типов поликристаллических структур, основанная на отличиях разных типов теплопередачи. Модель позволяет учитывать влияние формы сечения отливки и формы армирующих элементов на процессы кристаллизации. Приведены экспериментальные исследования, подтверждающие пространственное влияние разных материалов на процесс кристаллизации в ледяных физических моделях.

Ключевые слова: *фононная компонента, оптическая и акустическая ветви теплоемкости, температурные волны, профили узловых линий, комбинационное рассеивание, ячеистые и дендритные структуры, пространственное влияние материалов.*

Запропонована фізико-математична модель теплообміну, яка враховує квантові особливості теплообміну в рідинній та твердій фазах відливок. Зокрема, квантове комбіноване розсіювання теплових фононів і фотонів, а також дисперсію в оптичній та акустичній гілках теплового потоку. На базі моделі розглядаються особливості кристалізації та класифікація типів полікристалічних структур, яка обумовлена відмінностями різних типів теплопередачі. Модель дозволяє врахувати вплив форми перерізу відливки і форми армуючих елементів на процеси кристалізації. Наведено експериментальні дані, що підтверджують просторовий вплив різних матеріалів на процес кристалізації в крижаних фізичних моделях.

Ключові слова: *фононна компонента, оптична та акустична гілки теплоємності, температурні хвилі, профілі вузлових ліній, комбінаційне розсіювання, комірчасті і дендритні структури, просторовий вплив матеріалів.*

Proposed physical and mathematical model of heat transfer, which takes into account the quantum features of heat transfer in liquid and solid phase castings. In particular, the combined quantum scattering of thermal phonons, and photons, and the variance in the optical and acoustic branches of the heat flow. On the basis of the model describes the features of crystallization and classification of types of polycrystalline structures, based on the differences between various types of heat transfer. The model takes into account the influence of the cross section shape of the casting and form of reinforcing elements on the crystallization process. We present experimental studies, confirming the spatial effect of different materials on the crystallization of ice in the physical models.

* Сообщение 1 опубликовано в журнале «Процессы литья». – 2011. – № 2. – С. 60-70

Keywords: phonon component, optical and acoustic branches of the specific heat, thermal waves, the profiles of the nodal lines, Raman scattering, cellular and dendritic structure, the spatial impact of materials.

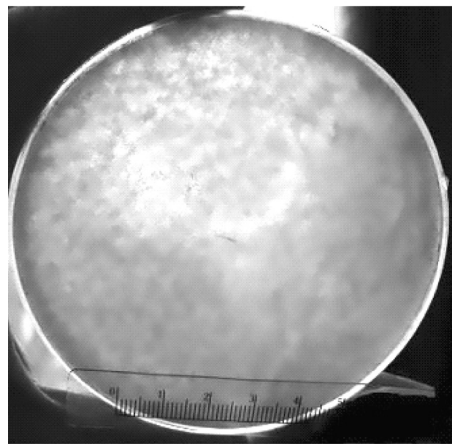
Влияние профилей температурных волн на морфологию поликристаллических структур. Физическое моделирование кристаллизации на ледяных моделях
Фронт кристаллизации в отливке представляет собой некоторую двумерную поверхность, поэтому часто рассматривается морфология двумерных кристаллов и поликристаллов, которая непосредственно связана с трехмерной морфологией. В этом случае все типы морфологий на мезо- и макроуровне можно свести к двум основным классам: ячеистым и дендритным структурам [1, 2]. Далее рассмотрены примеры физического моделирования поликристаллических структур.

Существует большой опыт физического моделирования процессов кристаллизации при формировании слитков, отливок и непрерывных заготовок с помощью прозрачных низкотемпературных сред [3]. Авторы исследовали ледяные модели после кристаллизации водных растворов органических веществ.

Органические молекулы при кристаллизации создают дополнительные связи в кристаллической решетке льда и дают возможность формирования новых поликристаллических структур (дендритов) на мезо- и макроуровне. Кристаллы и монокристаллы обычного льда можно увидеть лишь при достаточно большом увеличении и специальных режимах фотосъемки, рис. 1, а. Они представляют собой плотно упакованные ячеистые гексагональные структуры. Поликристаллические структуры в обычном льду без примесей на макроуровне обычно отсутствуют. В случае водных растворов простых молекулярных соединений без наличия больших молекул также не наблюдается появления дендритных структур на макроуровне. На рис. 1, б представлена фотография ледяной модели раствора йода.



а



б

Рис. 1. Кристаллы льда: а – речной лед под микроскопом; б – ледяная модель на основе раствора йода

Для дополнительного оптического эффекта все органические вещества подбирали темного цвета. Водный раствор с определенными органическими красителями в определенной концентрации разливали в круглые прозрачные ванночки, которые затем помещали в холодильную камеру прямоугольной формы. После кристаллизации образцы фотографировали цифровой камерой без предварительного увеличения.

Следует также отметить, что термин «ледяная модель» может употребляться для обозначения в технологии литья металлов и сплавов на основе низкотемператур-

ных ледяных моделей, которые испаряются. В то же время в данной работе также отдельно могут исследоваться процессы кристаллизации на основе физических ледяных моделей, а также физическое моделирование влияния различных добавок на структуру собственно ледяных моделей для отливок и на их физико-механические свойства.

В сообщении 1 [4] уже отмечали четыре основных физических уровня, на которых образуются стойкие кристаллические и поликристаллические образования, характеризующие материал и его механические свойства. Это уровни элементарной ячейки, кристаллита (максимального по размерам монокристалла в материале), дендритов и ячеистых поликристаллов, а также средний размер зерен (поликристаллических объединений) в металлах и сплавах. Доминирующими здесь будут размеры элементарной ячейки и кристаллита, так как они уже определяют все остальные размеры поликристаллических структур и их объединений.

Эти две структуры разных уровней отличаются устойчивостью формы и плотности упаковки атомных единиц. Для аморфных тел как элементарная ячейка, так и ячейки последующих полиструктур будут иметь неправильную форму, но при этом сохраняется средняя плотность упаковки атомных единиц.

Источниками же температурных волн формы могут быть как границы сечения отливка-форма, так и определенные зоны внутри выбранного сечения: перегретые или переохлажденные зоны, ликвидные зоны, концентрированные зоны зародышей концентрации, зоны примесей, армирующие элементы, зоны внешнего воздействия и т. п.

При проведении экспериментов в холодильной камере прямоугольной формы для температурных волн доминантными профилями распространения будут профили прямоугольных решеток. В круглой ванночке с раствором первичными будут радиальные и круговые профили, вторичными – профили прямоугольных решеток. Если температурные волны в холодильной камере имеют большую амплитуду (вследствие интенсивного теплоотвода), то эффект резонанса приводит к доминированию профилей прямоугольных решеток и в ванночке с раствором. Это определяет рост столбчатых дендритных поликристаллов (темные линии и участки на фотографии) в ледяной модели, то есть по профилям прямоугольных решеток, рис. 2, а. Такая же структура столбчатых дендритов характерна и для растворов с другими органическими красителями, рис. 2, б.

Характерно, что явления самоподобия и автомодельности, которыми отличаются температурные волны, присутствуют и в поликристаллических дендритных структурах ледяных моделей. Так, в районе низких частот температурных волн на рис. 2, а отчетливо видно два выраженных дендритных участка, а на рис. 2, б таких участков три (два – на краях ванночки).

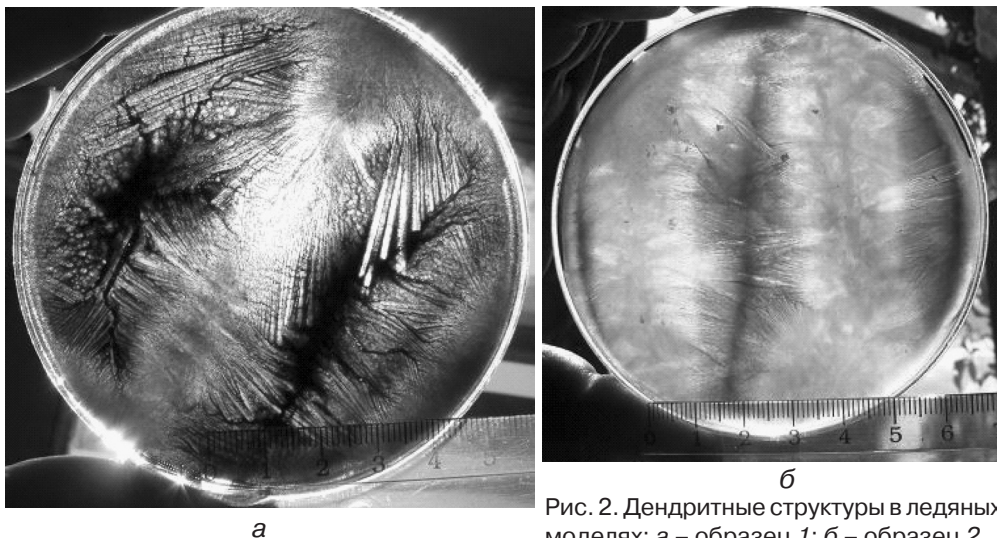


Рис. 2. Дендритные структуры в ледяных моделях: а – образец 1; б – образец 2

Скорость теплоотвода от отливки влияет не только на формирование поликристаллов, но в некоторых случаях и на формирование элементарных ячеек кристаллитов. При большой скорости охлаждения металла на металлических подложках, как известно, удалось получить аморфную структуру металлических кристаллитов [5]. Металл со стеклоподобной структурой имеет весьма необычные свойства: высокую прочность и коррозионную устойчивость, большую магнитную проницаемость.

Если в среде отливки находятся области кристаллизации эллипсоидальной симметрии, то они тоже могут формировать дендритные структуры по радиальным и эллипсоидальным профилям. Это происходит тогда, когда скорость теплоотвода в зоне больше, чем в окружающей матрице.

Ледяная модель водного раствора с не полностью растворившимся активированным углем представлена на рис. 3, а. Более крупные частицы консолидируются в центры кристаллизации эллипсоидальной и сферической симметрии. Линии пучностей стоячих температурных волн при периодическом перегревании и переохлаждении накапливаются и замораживают в поликристаллических структурах частички мелкой угольной пыли и другие примеси. Такие радиальные и эллипсоидальные линии довольно четко просматриваются на фотографии (рис. 3, а). Аналогичным образом равноосные дендритные образования формируются на профилях косоугольных решеток, образуя еще один тип морфологии дендритных структур.

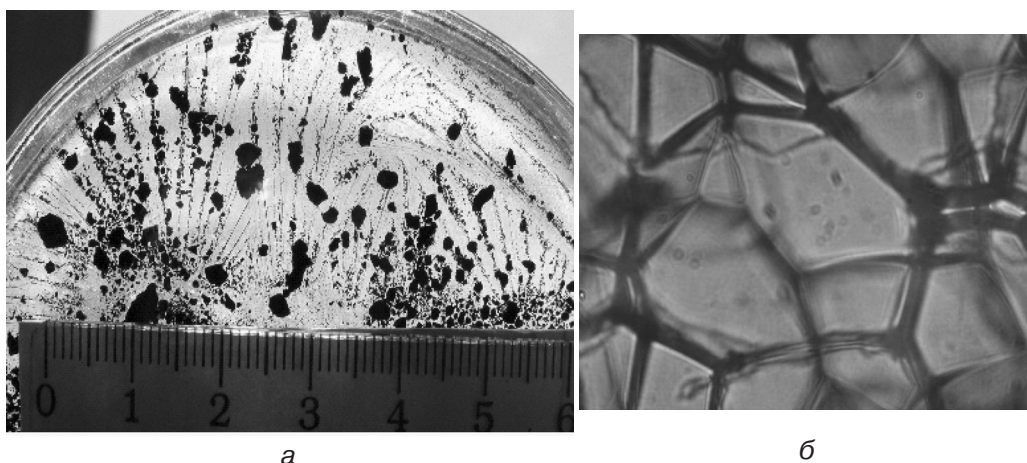


Рис. 3. Поликристаллические структуры: а – в ледяной модели с частичками активированного угля, растворившегося частично в водном растворе; б – ячеистая структура полистирола с неправильными ячейками

К дендритным структурам относят также следующий тип дендритно-поликристаллической морфологии. Если в некоторой области кристаллизации переохлаждения недостаточно для того, чтобы вся область закристаллизовалась как ячеистая структура, то в ней возникают лишь зоны ячеистых структур. При определенной высокой концентрации таких ячеистых зон теплота кристаллизации, которую они выделяют, не дает возможности возникновения сплошных плотных дендритных структур в окружающем пространстве. Такая область кристаллизации будет состоять из островков ячеистых структур на фоне общей светлой зоны с более низким коэффициентом упаковки в поликристаллах. Описанную дендритно-ячеистую структуру относят к «субдендритным» [6]. Возможен и «обратный вариант», когда плотность упаковки в ячеистых зонах меньше, чем в окружающей их матрице.

Рассмотрим теперь морфологию ячеистых структур. В работах [1, 2] приведены основные двумерные морфологии ячеистых структур: с вытянутыми ячейками, с неправильными ячейками и плотно упакованные структуры с квадратными или гексагональными ячейками.

Основным определяющим фактором плотности упаковки при кристаллизации является температура переохлаждения жидкой фазы [1, 2]. Ячеистые структуры возникают из субдендритных, где концентрация ячеистых зерен достаточно велика, чтобы далее образовалась сплошная ячеистая зона. Такие зерна будут иметь температуру ниже, чем окружающая жидкая фаза, и при достаточной концентрации будут обуславливать более высокий градиент снижения температуры, чем внешний теплоотвод от отливки. Это означает, что в прилегающей к зоне жидкой фазы будут доминировать профили температурных волн, которые определяются образованными ячеистыми кластерами.

Как уже отмечалось, следует также обратить внимание на скорость переохлаждения, которая при высоких значениях оказывает большее влияние на поликристаллизацию и даже кристаллизацию, чем температура переохлаждения. Как уже подчеркивалось, наибольшую амплитуду будут иметь те температурные волны, которые создают резонансы с температурными волнами максимальной амплитуды на основных физических уровнях, то есть на уровнях длины волны, сопоставимой с размерами кристаллитов и элементарных ячеек. Такие резонансы, очевидно, редко распространяются на частоты, расположенные очень близко друг к другу. Но большая скорость переохлаждения, которая может зависеть и от свойств материала, где происходит кристаллизация, способна породить феномен кристаллизации для температурных волн с близкими частотами.

Вследствие дискретности частоты и длины температурных волн (с максимальной амплитудой не более 2-4) образование ячеек в одной плоскости происходит одновременно на нескольких уровнях при разных длинах температурных волн. Такой процесс следует отнести к фрактальным процессам [7], когда кристаллизация граней ячейки, имеющих более плотную упаковку, происходит случайным образом, и форма ячейки получается неправильной.

На рис. 3, б представлена ячеистая структура полистирола с неправильными ячейками. На фотографии видно, что грани ячеек имеют до трех разных размеров толщины, то есть можно предположить, что в образовании ячеистой структуры принимали участие не менее трех температурных волн с разной, но близкой длиной волны.

Если суммировать, то приходим к выводу, что при кристаллизации существует шесть основных общих типов морфологии поликристаллических структур: три типа морфологии относятся к дендритным структурам (столбчатые дендриты, равноосные дендриты и субдендритные структуры с ячеистыми кластерами); три типа морфологии – к ячеистым (с вытянутыми ячейками, неправильными ячейками и плотно упакованными ячейками кубической или гексагональной упаковки).

Предлагаемая схема классификации поликристаллических структур не противоречит уже известным описаниям и классификациям, но непосредственно связана с вышеизложенной физико-математической моделью, основанной на концепции температурных волн. Такая модель, в свою очередь, дает возможность во многих случаях заменить неэкономичные экспериментальные исследования компьютерным математическим моделированием процессов плавления, затвердевания и остывания металлических отливок.

О необходимости построения новых, более полных и эффективных физико-математических и соответствующих компьютерных моделей в металлургии и литейном производстве, тем более после появления нанотехнологий, высказываются многие авторы [8], которые предлагают также создать базы знаний и банков данных для различных физико-математических моделей и инженерных расчетов по ним с целью обобщения и выбора наиболее эффективных и оптимальных для конкретных практических приложений [8].

Пространственное влияние материала на кристаллизацию

В работе [9] рассмотрена концепция пространственного взаимодействия термодимических потенциалов при тепловых и химических процессах в применении к

кристаллизации и охлаждению металлических отливок. Кратко суть модели состоит в следующем: известны уравнения общей теории относительности, которые подтверждены экспериментально

$$\alpha \cdot G_{ij} = R_{ij} - \frac{1}{2} \cdot R \cdot g_{ij}, \quad (1)$$

где G_{ij} – тензор энергии-импульса, Дж/м²; R_{ij} – тензор кривизны в соответствующей римановой геометрии; g_{ij} – метрический тензор; α (м²/Дж) и R – постоянные.

Если предположить, следуя общей концепции, что не только потенциальная энергия распределения масс способна изменять структуру пространства, порождая поле тяготения, но и любой другой вид энергии, как, например, в случае электромагнитного поля, то приходим к выводу, что тепловые, химические и процессы межфазовых переходов также должны порождать соответствующие пространственные взаимодействия. В работах [9-11] изложена физико-математическая модель таких пространственных взаимодействий и аргументировано, что их следует относить к слабым взаимодействиям информационного типа, то есть влияние посредством пространственного поля на другие подобные процессы происходит не непосредственно, а в основном, на старшие производные соответствующих параметров.

Чтобы применить уравнение (1) к процессам кристаллизации, сделаем некоторые упрощения. Во-первых, откажемся от псевдоэвклидовой метрики, то есть время будет не четвертой мнимой координатой, как это принято в общей теории относительности, а обычным параметром, поэтому индексы в (1) будут соответствовать лишь трем пространственным координатам.

Для интерпретации правой части в (1) в схематическом виде изложим основные особенности римановой геометрии. Зафиксируем в эвклидовом пространстве (\mathcal{E}) в некоторой точке O ортонормированный базис $\vec{k} = \{\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3\}$. Орты $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$ – единичной длины и ортогональны между собой. Если эвклидово пространство \mathcal{E} превращается в риманово пространство R , то это означает, что в окрестности ба-

зиса \vec{k} пространство как бы деформируется, орты $\vec{k}_1 - \vec{k}_3$ изменяют свою длину (сжимаются-растягиваются), изменяются также углы между ними. Это основная, хоть и упрощенная интерпретация криволинейных координат в Римановой геометрии. Новый базис в точке O будет определяться метрическим тензором g_{ij} а также тензором кривизны риманова пространства R . Новый криволинейный базис обозначим через

$$\vec{q} = \{\vec{q}_1, \vec{q}_2, \vec{q}_3\}. \quad (2)$$

Тогда метрический тензор в точке O можно определить как скалярное произведение новых ортов

$$g_{ij} = \vec{q}_i \cdot \vec{q}_j; \quad g_{ii} = |\vec{q}_i|^2. \quad (3)$$

Углы между новыми ортами $\vec{q}_1 - \vec{q}_3$ будут определять тензор кривизны. Изменения длины первоначальных эвклидовых ортов базисного репера и углов между ними в физическом смысле означают, что в точке O появилось и действует некоторое силовое поле.

Теперь приблизительно оценим применительно к уравнению (1) потенциальную энергию кристалла или поликристаллической структуры в некоторой точке O . При отклонении атомной единицы во время теплового движения либо целой группы атомных единиц (фононное возбуждение) от положения равновесия возникает упругая сила, которая возвращает такую группу атомных единиц обратно. Такую силу можно оценить тензором σ_{ij} , подобным тензору напряжений в теории упругости. В сущности, на макроуровнях тензор σ_{ij} совпадает с обычным тензором напряжений, только причиной возникновения малых деформаций служит процесс теплопередачи.

Проведем через выбранную точку O произвольное сечение и рассмотрим двумерную задачу теплопереноса при пренебрежении тепловым потоком по третьей координате. Поскольку теплопередача в таком сечении осуществляется посредством температурных волн [4]

$$\begin{aligned}
 u_d(x, y, t) &= \frac{2}{\sqrt{b_1 b_2}} \sum_{m, n=1}^{\infty} C_{mn} e^{-\lambda_{mn}(d^2 - f^2)t} \times \\
 &\times \cos(2df\lambda_{mn}t) \cdot \sin \frac{m\pi}{b_1} x \cdot \sin \frac{n\pi}{b_2} y; \\
 u_f(x, y, t) &= \frac{2}{\sqrt{b_1 b_2}} \sum_{m, n=1}^{\infty} C_{mn} e^{-\lambda_{mn}(d^2 - f^2)t} \times \\
 &\times \cos(2df\lambda_{mn}t + \frac{\pi}{2}) \cdot \sin \frac{m\pi}{b_1} x \cdot \sin \frac{n\pi}{b_2} y
 \end{aligned} \tag{4}$$

с ограниченным спектром, то тепловой тензор напряжений естественно связать отдельно с каждой из температурных волн, которая определяется в выражении (4) двумя индексами $m, n - \sigma_{ijmn}$.

Умножив тепловой тензор малых напряжений на максимальную амплитуду $A_{mn} = C_{mn}$ (4) для соответствующей температурной волны, получим работу, которую можно приравнять к части потенциальной энергии P_{ijmn} элементарной ячейки, кристаллита или поликристалла, непосредственно связанную с теплопередачей отдельного температурного осциллятора. Суммирование по индексам m, n дает среднюю оценку потенциальной энергии кристаллической (или аморфной) решетки в точке O .

Далее сделаем еще несколько упрощений. Будем оценивать лишь ту часть потенциальной энергии поликристалла, которая связана с изменениями длины ортов первоначального репера. В этом случае компоненты тензора кривизны в (1) равны нулю и значения σ_{ijmn} при $i \neq j$ можно не рассматривать. Предположим также, что процесс теплопередачи является изотропным. Тогда, согласно формулам в работе [12]

$$\sigma_{iimn} = \frac{E}{1 - 2\nu} \cdot \varepsilon_{iimn}, \tag{5}$$

где E – модуль Юнга, н/м²; ν – коэффициент Пуассона; ε_{iimn} – деформация вдоль i -й оси, обусловленная температурной волной с длиной волны l_{mn} .

В таком случае тензор потенциальной энергии кристалла или поликристалла P_{iimn} (Дж/м²) материала s и зависящий от него метрический тензор g_{iimn} (1) будут связаны следующими зависимостями:

$$\begin{aligned}
 P_{iimn}(x_1, x_2, t) &= \sigma_{iimn} C_{mn} = \frac{E_s}{1 - 2\nu_s} \cdot C_{mn} \cdot \varepsilon_{iimn}(x_1, x_2, t); \\
 \beta \cdot \frac{E_s}{1 - 2\nu_s} \cdot C_{mn} \cdot \varepsilon_{iimn}(x_1, x_2, t) &= -g_{iimn}(x_1, x_2, t),
 \end{aligned} \tag{6}$$

где β – постоянная (м²/Дж), определяющая коэффициент пространственного действия кристаллической или аморфной структуры.

Как уже отмечалось, изменение метрического тензора равносильно появлению некоторой силы, действию поля. Из выражения (6) следует, что эта сила направлена противоположно силам межатомного и межмолекулярного взаимо-

действия в кристалле, то есть ослабляет их, уменьшая потенциальную энергию взаимодействия. Уравнения (6) позволяют также сделать некоторые обобщения и на трехмерный случай для оценки пространственного действия определенного материала. Предположим, что в точке $O(x_1, x_2, x_3)$ находятся элементарная ячейка, кристаллит либо поликристалл материала s . Оценим пространственное влияние материала s , сосредоточенного в точке O , на некоторую другую точку $O'(x'_1, x'_2, x'_3)$, которая находится на расстоянии R от точки O . Очевидно, что влияние пространственного поля материала s с расстоянием будет уменьшаться. Естественно также предположить, что такое уменьшение пропорционально площади сферы радиуса

$R = \sqrt{(x'_1 - x_1)^2 + (x'_2 - x_2)^2 + (x'_3 - x_3)^2}$ с центром в точке $O(x_1, x_2, x_3)$. Впоследствии приходим к формуле для произвольного момента времени

$$g_{iimnk}(x'_1, x'_2, x'_3) = \frac{g_{iimnk}(x_1, x_2, x_3)}{4\pi R^2}. \quad (7)$$

Из решений (4) для температурных волн следует, что тепловые деформации в (6) также должны представлять собой стоячие волны, пучности которых расположены по профилям, описанным ранее. Общее решение краевой задачи уравнения теплопроводности для ограниченных тел [13] позволяет сделать вывод, что трехмерное решение для параллелепипеда будет подобным по структуре решению двумерной задачи (4) для прямоугольной мембраны. Так как деформация ϵ_{ii} определяется относительным удлинением (сжатием) произвольного отрезка, то ϵ_{iimn} в (6) можно приблизительно заменить отношением среднего отклонения за четверть периода температурной волны, то есть $C_{mn}/2$, к четверти длины соответствующей температурной волны – $l_{mn}/4$. В трехмерном случае параметры температурной волны будут зависеть от трех индексов и тогда, объединяя уравнения (6) и (7), получим

$$g_{iimnk}(R) = -\frac{\beta}{2\pi} \cdot \frac{E_s}{1 - 2\nu_s} \cdot \frac{C_{mnk}^2}{l_{mnk}} \cdot \frac{1}{R^2}. \quad (8)$$

Формула (8) дает приближенную численную оценку пространственного влияния материала s , сосредоточенного в некоторой точке. Оценка (8) не учитывает резонансы температурных волн, которые приводят к резкому увеличению тепловых деформаций, и комбинированное рассеивание температурных волн. Опять же, знак минус в (8) (как и в формулах (6)) позволяет сделать вывод, что пространственное действие материала s приводит к уменьшению плотности упаковки внутри поликристаллов материала w , который взаимодействует с s . Такое действие обратно пропорционально квадрату расстояния и, естественно, наиболее проявляет себя при межфазовых переходах 1 и 2-го рода в материале w .

Для экспериментального подтверждения пространственного действия материала вышеописанные опыты по замораживанию ледяных моделей были несколько изменены. В горячей воде после кипячения растворяли органические добавки, после чего раствор разливали в две одинаковые круглые прозрачные ванночки в одинаковом количестве. Ванночки накрывали крышкой. На крышке одной из ванночек размещали образец из определенного материала. Вторая оставалась контрольной. Обе ванночки выдерживали при комнатной температуре в одинаковых условиях не менее 1 ч. Затем образец s снимали, и обе ванночки помещали в холодильную камеру. После замораживания обе ледяные модели фотографировали цифровой камерой без увеличения.

На рис. 4 представлены результаты эксперимента с тремя разными материалами, органические добавки в этих трех случаях тоже были разные. В качестве материа-

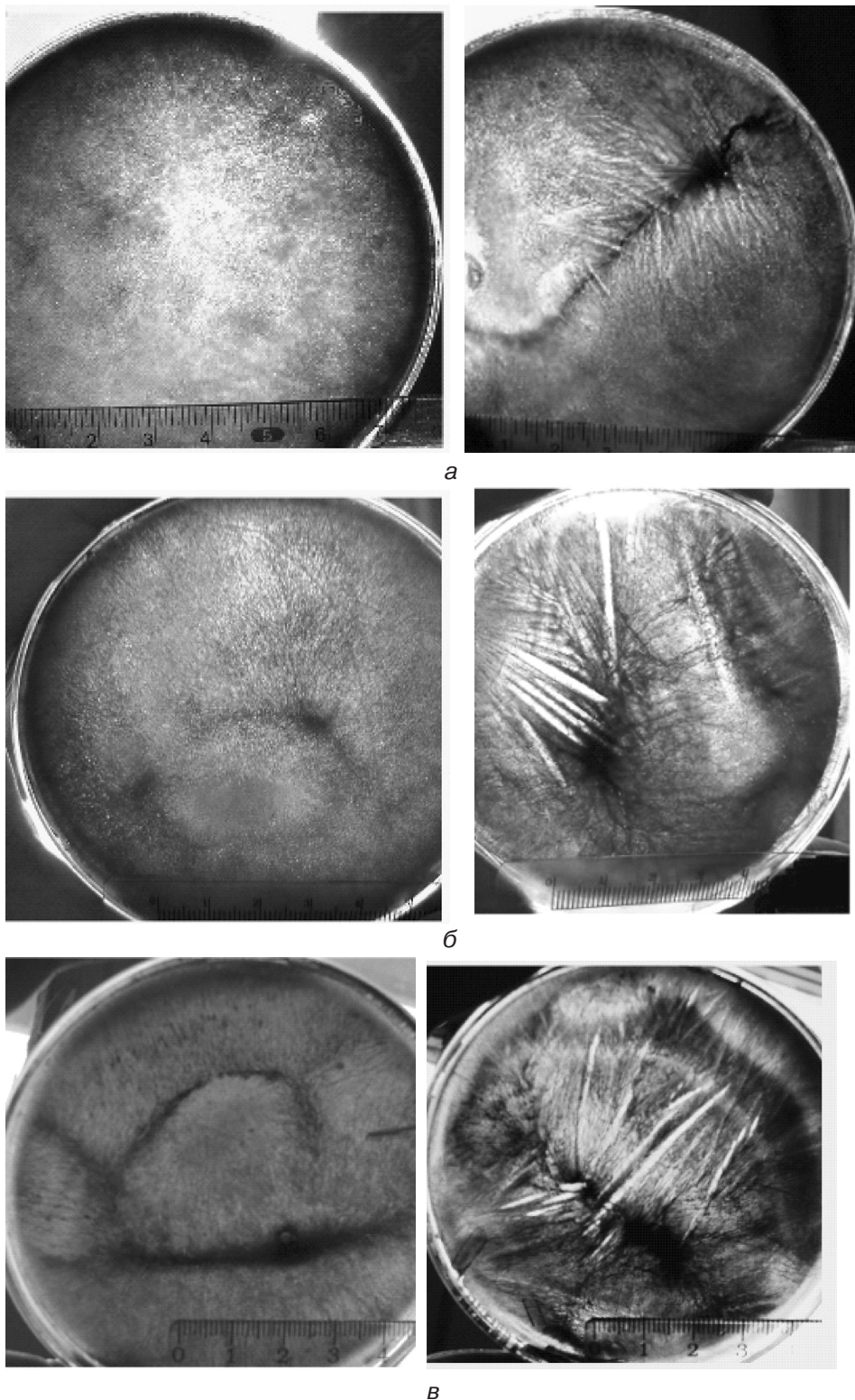


Рис. 4. Пространственное влияние материала на кристаллизацию (вторая фотография – контрольный образец): а – влияние деревянного образца; б – материал – каменный уголь; в – влияние металлического образца

лов воздействия использовали дерево, каменный уголь и металл. В контрольных образцах (рис. 4, второй снимок, а-в)) во всех трех экспериментах присутствуют ISSN 0235-5884. Процессы литья. 2011. № 3 (87)

выраженные дендритные структуры на макроуровнях. В ледяных моделях, где было воздействие материала (первые снимки), такие поликристаллические структуры почти отсутствуют, и фотографии моделей, которые подвергались пространственному воздействию материалов, значительно отличаются от фотографий контрольных образцов с такими же добавками, но без воздействия близко расположенных предметов и т. п.

Ледяные модели после воздействия материалов имеют почти сплошную светлую окраску по сравнению с контрольными, где присутствуют темноокрашенные дендритные структуры, расположенные по профилям температурных волн разной длины волны. Как уже отмечалось, светлые зоны на фотографиях обозначают области с менее плотной упаковкой в поликристаллах.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные подтверждают теоретический вывод предложенной физико-математической модели о том, что пространственное действие материала приводит к уменьшению плотности упаковки внутри поликристаллов материала воздействия. Такой вывод важен, в частности, для понимания механизмов формирования близлежащего слоя вокруг армирующих элементов в металлах и сплавах.

Полученные результаты при их дальнейшем экспериментальном подтверждении могут быть использованы для получения новых видов сплавов, стекла, пластмасс и других материалов с прогнозируемыми свойствами. При этом следует учитывать как скорость теплоотвода, так и форму сечения отливки или армирующих элементов, их концентрацию, размеры, материал как армирующих элементов, так и формы для отливки, а также частоты внешних физических воздействий.



Список литературы

1. Козлова О. Г. Рост и морфология кристаллов. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 356 с.
2. Овсиенко Д. Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. – Киев: Наук. думка, 1994. – 254 с.
3. Эльдарханов А. С., Ефимов В. А., Мурадинов В. С. Процессы формирования отливок и их моделирование. – М.: Машиностроение, 2001. – 208 с.
4. Квантовые особенности теплообмена и кристаллизации в отливках. Сообщение 1 / В. З. Тыднюк, О. И. Шинский, В. П. Кравченко и др. // Процессы литья. – 2011. – № 2 – С.
5. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987. – 327 с.
6. Синчук А. В., Волков Г. В. Предпосылки использования электрогидроимпульсной обработки расплава для получения недендритной структуры в литых сплавах // Процессы литья. – 2009. – № 2. – С. 30-35.
7. Mandelbort B. B. The fractal geometry of nature. – New York: Frecman and Co., 1970. – 271 p.
8. Соколовская Л. А., Мамишев В. А. О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве // Процессы литья. – 2009. – № 2. – С. 24-29.
9. Информационная модель мониторинга процесса кристаллизации литых металлоизделий с использованием физики пространственных взаимодействий термохимических потенциалов / В. З. Тыднюк, О. И. Шинский, В. П. Кравченко, и др. // Там же. – 2010. -№ 1 – С. 7-19.
10. Tydnjuk V. Z., Kravchenko V. P., Mul O. V. Naturally contolled processes and theory of relativity. – Universidade de Aveiro, 2005. – 13 p.
11. V. Z. Tydnjuk, V. P. Kravchenko, O. V. Mul. Naturally contol of energy material processes and theory of relativity. – Universidade de Aveiro, 2005. – 10 p.
12. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 575 с.
13. Тихонов Л. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 735 с.

Поступила 10.09.2010