

от диаметра аппарата.

### Литература

1. Сандуляк А.А. Совершенствование режимов и систем магнитной очистки технологических сред для предупреждения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации энергетического оборудования. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, М., 2005.
2. Ершова В.А. Исследование характеристик рабочих зон магнитных очистных аппаратов как средств предупреждения чрезвычайных ситуаций в условиях коррозии и износа оборудования. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, М., 2007.
3. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Пугачева М.Н., Мартынов О.В. Особенности магнитных сепараторов для очистки сырья от ферропримесей. – Хлебопродукты, 2008, № 9, с.42-43.
4. Фролов В.Н., Маслов А.Н., Кудреватых Н.В. Расчет магнитного поля в системах из постоянных магнитов и магнитно-мягких элементов. – Электротехника, 1999, № 10, с.42-43.

### **Метод изучения структурообразования металла с целью получения информации для управления процессом затвердевания изделий, кристаллизующихся в условиях двухфазной зоны**

к.ф.-м.н. с.н.с. Сулимцев И.И.  
МГТУ «МАМИ»

Формирование изделия из металлического расплава во многих технологических процессах автомобильной промышленности проходит в условиях одновременного отвода тепла и воздействия внешнего давления. При этом характерной особенностью процессов является наличие в обрабатываемом объеме областей, где одновременно существуют как твердая, так и жидкая фазы. Такое состояние называют двухфазной зоной. Конечные свойства поковки, например, существенно зависят от режима обработки двухфазной зоны при формировании поковки. Проблема управления структурообразованием кристаллизующейся в условиях двухфазной зоны поковки является многоплановой и в настоящее время интенсивно разрабатывается в различных направлениях [1].

В настоящей статье рассматривается метод изучения структурообразования в двухфазной зоне, дающий возможность прямым путем получить информацию о развитии структуры твердой части двухфазной зоны и о составе ее жидкой части (ликвата) в физически малом объеме кристаллизующейся двухфазной зоны на различных этапах затвердевания.

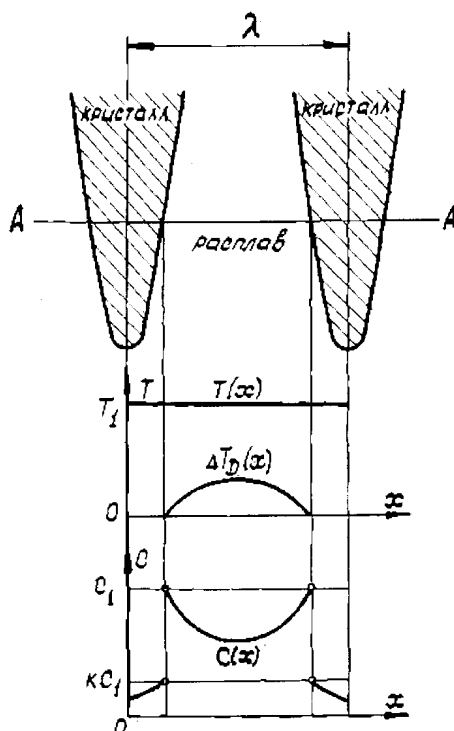
Еще Д.К. Черновым было установлено [2], что граница между твердой и жидкой фазами кристаллизующегося стального слитка весьма разветвлена. Последующие производственные и лабораторные исследования позволили установить, что протяженность (глубина) этой границы в типичных условиях затвердевания может составлять  $10^{-2}$  -  $10^2$  см. Область (объем) пространства, занимаемая совместно существующими твердой и жидкой фазами и отделяющая полностью затвердевший металл от расплава, и есть двухфазная зона [3, 4, 5]. По современным представлениям именно в двухфазной зоне протекают основные процессы, приводящие к образованию дендритной, зеренной и другой структуры, неметаллических включений, различных типов дефектов в конечном продукте. Типичным свойством двухфазной зоны является значительная величина межфазной поверхности.

Строение двухфазной зоны позволяет рассматривать некоторый характерный элемент (ячейку) в ней, совокупное развитие процессов кристаллизации в которых образует объем затвердевающего металла.

Рассмотрим (рис. 1) распределение температуры и концентрации в пространстве между соседними ячейками (расположенными на среднем расстоянии  $\lambda$  друг от друга), в которых растут дендритные кристаллы [6].

Можно считать [6], что температура  $T$  и концентрация  $C$  на поверхностях контакта кристаллов с жидкостью соответствуют равновесной диаграмме сплава. Однако внутри межкристаллитной жидкости равновесие не соблюдается. Для типичных междендритных расстояний

(0,01 мм – 1 мм) температура в объеме ячейки практически постоянна и равна температуре фронта кристалл-расплав (рис. 1); концентрация же непостоянна, поскольку имеется существенное различие коэффициентов теплопроводности ( $\sim 0,1 \text{ см}^2/\text{с}$ ) и диффузии ( $\sim 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ ) в жидких металлах. По этой причине в каждой точке  $x$  расплава (рис. 1) возникает пересыщение  $\Delta C_1 = C_1 - C(x) = \Delta CD(x, T_1)$ , эквивалентное наличию диффузионного переохлаждения  $\Delta TD(x, T_1)$ . Если считать наклон линии ликвидуса примерно постоянным (рис. 2), то  $\Delta TD(x, T_1) = \alpha \Delta CD(x, T_1)$ . В случае криволинейной диаграммы под  $\alpha$  следует понимать средний дифференциальный наклон линии ликвидуса. Из рис. 1 можно видеть, что разность  $\Delta TD(x, T_1)$  между равновесной температурой, соответствующей составу  $C(x)$ , и действительной температурой  $T_1$  по мере приближения к границе (на расстоянии  $\lambda/2$  от оси кристаллов) ячейки возрастает.



**Рис. 1. Схема (одномерная) распределений концентрации и температуры в дендритных ячейках двухфазной зоны:**

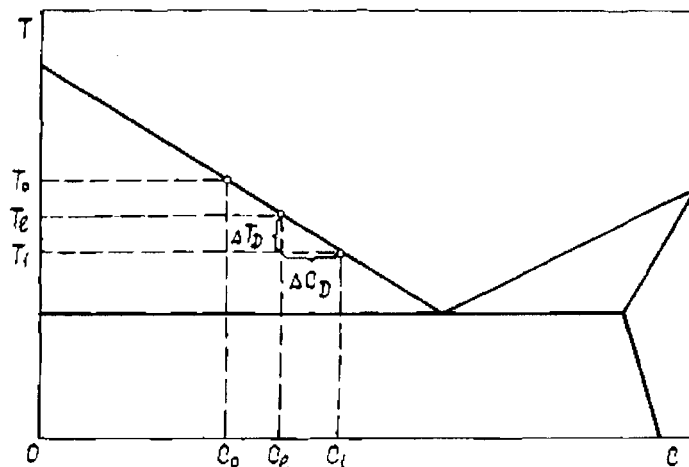
$C_1$  - состав жидкости на поверхности кристалла (в точках пересечения плоскостью AA');  
 $C(x)$  - распределение концентрации;  $C_1 - C(x) = \Delta CD$  - диффузионное пересыщение в точке  $x$ ;  $T_1$  - температура на фронте затвердевания;  $T(x)$  - распределение действительной температуры;  $\alpha \Delta CD = \Delta TD$  - диффузионное переохлаждение в точке  $x$  ячейки;  $\lambda$  - среднее расстояние между ячейками

В проводимых опытах междендритная жидкость могла быстро удаляться из объема, занимаемого кристаллизующимся расплавом. Это позволило определить ее равновесную температуру ликвидуса  $T_L$  для каждого данного состояния кристаллизации ячеек (двухфазной зоны). Определение температуры  $T_L$  осуществлялось путем независимого термического анализа ликвата на той же установке. Естественной величиной, характеризующей неполноту протекания диффузионных процессов в ячейках элементарного объема является разность  $T_L - T = \Delta TD$ , где  $T$  - температура двухфазной зоны,  $\Delta TD$  – среднее диффузионное переохлаждение в элементарном объеме двухфазной зоны в момент экстракции.

Реализация установки для исследования кристаллизующейся двухфазной зоны модельных сплавов приведена на рис. 3.

При проведении опыта с понижением температуры образца (двухфазной зоны), размещенного на опорной сетке 7 (рис. 3), в нужный момент времени открывался кран вакуумной

системы или включался электромагнитный клапан, соединенные с втулкой 12. Междендритная жидкость (ликват) экстрагировалась из объема двухфазной зоны, а на опорной сетке оставался дендритный каркас (остов, рис. 4). Ликват задерживался ловушкой 17, извлекался, взвешивался и подвергался термическому анализу. Каркас (рис. 4) взвешивался и различными методами изучалась его дендритная структура.



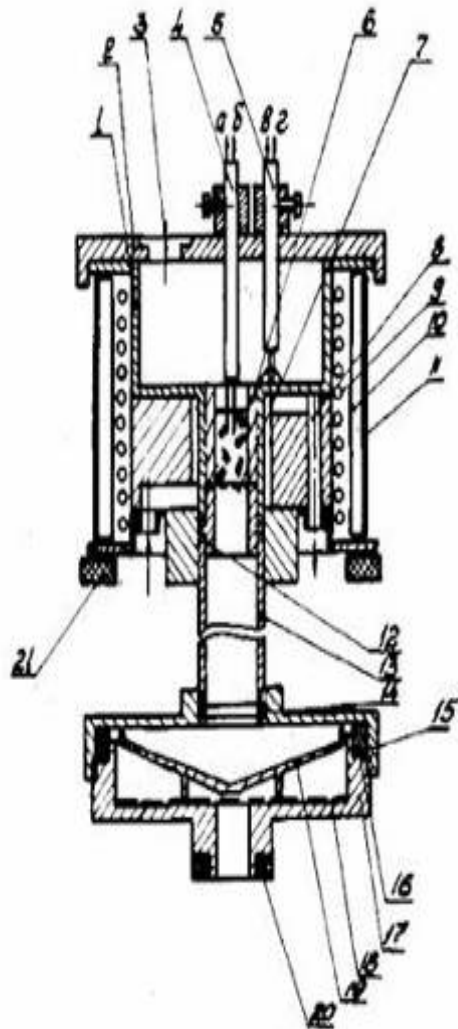
**Рис. 2. Схема определения диффузионного переохлаждения и диффузионного пересыщения:  $T_0$  - равновесная температура ликвидус сплава;  $T_L$  - равновесная температура ликвидус ликвата;  $T_1$  - температура экстракции;  $T_L - T_1 = \Delta TD$  - диффузионное переохлаждение ликвата (междендритной жидкости) при температуре  $T_1$  элементарного объема двухфазной зоны;  $C_0$  - исходный состав сплава;  $C_L$  - действительный состав ликвата;  $C_1$  - состав ликвата по равновесной диаграмме при температуре  $T_1$  экстрагирования;  $C_1 - C_L = \Delta CD$  - диффузионное пересыщение ликвата при температуре  $T_1$  элементарного объема двухфазной зоны**

Типичной особенностью распределения диффузионного переохлаждения в жидкой части двухфазной зоны является установленный для модельных сплавов принцип подобия. Если использовать максимальную величину диффузионного переохлаждения в двухфазной зоне (рис. 5) в качестве масштабного фактора при описании кинетики развития диффузионного переохлаждения в кристаллизующемся элементарном объеме двухфазной зоны, то полученная таким путем нормированная кривая (рис. 6) одинакова для изученных сплавов. Это указывает на подобный характер процессов кристаллизации двухфазной зоны изученных бинарных сплавов.

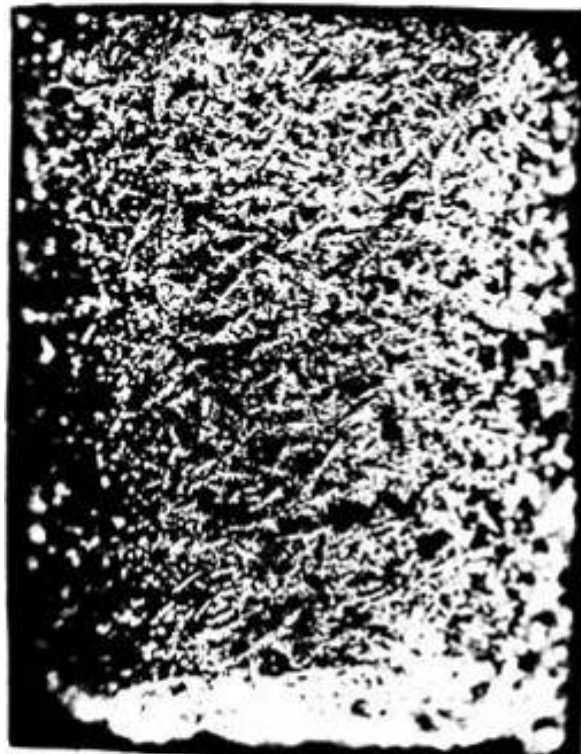
Наблюдение морфологических изменений структуры двухфазной зоны при различных значениях диффузионного переохлаждения в ней позволили установить тесную связь диффузионного переохлаждения с морфологией кристаллизующейся двухфазной зоны. На рис. 7 и рис. 8 зафиксировано состояние кристаллической части двухфазной зоны сплава Sn + 60 вес. % Pb при такой температуре  $\Delta T$ , которая соответствует начальному участку на зависимости  $\Delta TD(\Delta T)$ . Растущие в дендритных ячейках двухфазной зоны кристаллы содержат, в основном, лишь главные (первичные, начальные) элементы будущей структуры – оси первого порядка. В отдельных дендритных ячейках имелись условия для возникновения следующих структурных составляющих двухфазной зоны – осей второго порядка. По мере увеличения среднего диффузионного переохлаждения в элементарном объеме двухфазной зоны, т.е. по мере продвижения вверх по кривой  $\Delta TD(\Delta T)$ , происходит дальнейший рост уже возникших элементов дендритной структуры, а также достройка первичных осей осями второго (рис. 9) и третьего порядка (рис. 10).

При значениях температур  $\Delta T$  двухфазной зоны, лежащих в окрестности такой ее температуры, для которой средняя величина диффузионного переохлаждения в исследуемом объеме сплава максимальна, имеются условия возникновения последних, самых мелких,

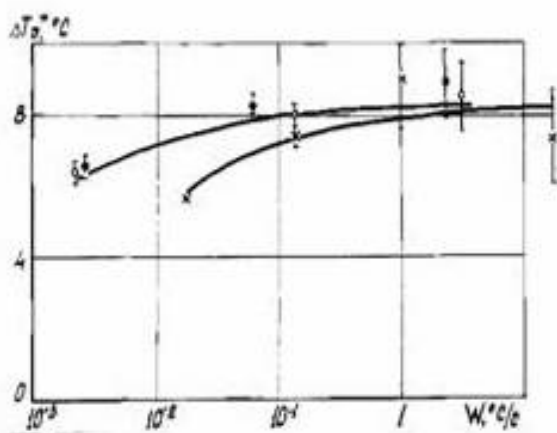
элементов дендритной структуры сплава - осей четвертого порядка (рис. 11). Дальнейшее понижение температуры (увеличение  $\Delta T$ ) двухфазной зоны, сопровождавшееся уменьшением величины диффузионного переохлаждения в ее жидкой части, не приводило, судя по результатам наблюдений, к возникновению новых (еще более высокого порядка) элементов дендритной структуры.



**Рис. 3.** Схема установки для изучения кинетики развития структуры двухфазной зоны (в ее элементарном объеме) и диффузионного переохлаждения в ней.  
 1- корпус камеры; 2- крышка; 3 – окно;  
 4 – термопара измерительная; 5- термопара сравнения; 6 – цилиндрический составной тигель; 7- сетка (дно тигля); 8 – канал для охладителя; 9 – нагреватель; 10 – теплоизоляция; 11 – кожух; 12 – втулка;  
 13 – патрубков; 14 – уплотнение; 15 – крышка; 16 – уплотнение ловушки; 17 – корпус ловушки;  
 18 – фильтр; 19 – отражатель;  
 20 – уплотнение; 21 – опора

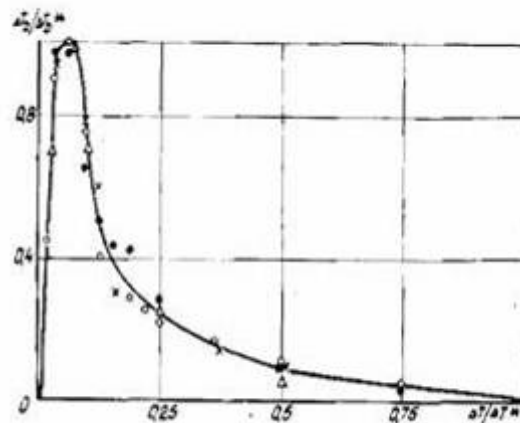


**Рис. 4.** Общий вид типичного дендритного каркаса (остова), остающегося на опорной сетке тигля после проведения экстракции междендритной жидкости из элементарного объема двухфазной зоны.  
 Увеличение  $\times 7,8$



**Рис. 5. Максимальное диффузионное переохлаждение в элементарном объеме двухфазной зоны при различных скоростях охлаждения сплавов:**

- - Sn + 60 вес. % Pb;
- - Cd + 30 вес. % Zn;
- х - Zn + 55 вес. % Sn



**Рис. 6. Зависимость приведенного (нормированного на максимальное значение) диффузионного переохлаждения в элементарном объеме от приведенной (нормированной на интервал затвердевания) температуры двухфазной зоны сплавов:**

- - Sn + 60 вес.% Pb;
- - Cd + 30 вес.% Zn;
- х - Zn + 55 вес.% Sn



**Рис. 7. Строение кристаллической части двухфазной зоны сплава Sn + 60 вес. % Pb. Скорость охлаждения 0,09 °C/с, ΔT = 0,2 °C, ΔTD = 0,7 °C , х 350**



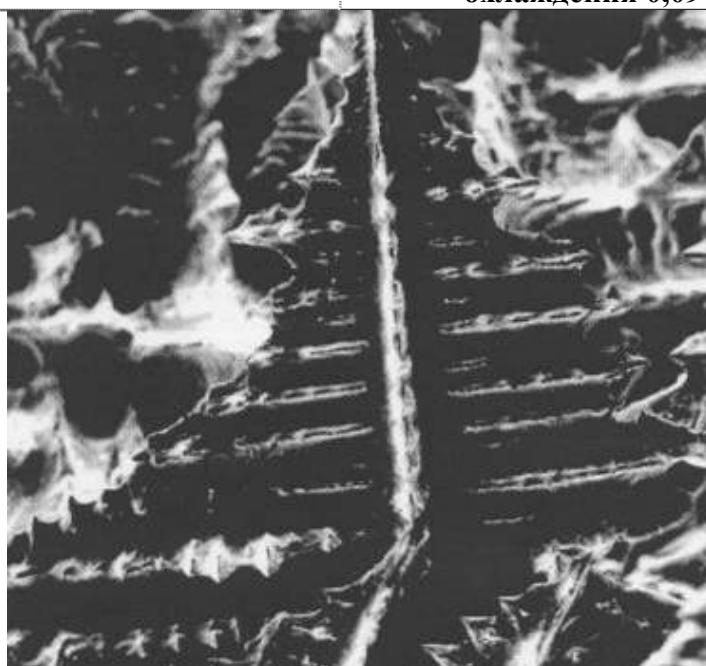
**Рис. 8. То же, что и на рис. 7, общий вид, х160**



**Рис. 9.** Диффузионное переохлаждение ликвата возрастает. Заканчивается развитие осей второго порядка.  $\Delta T = 2,09$  °C,  $\Delta TD = 2,8$ °C; Sn + 60 вес. % Pb, скорость охлаждения 0,09 °C/c, x 520



**Рис. 10.** Диффузионное переохлаждение ликвата продолжает возрастать. Начинают формироваться и расти оси третьего порядка.  $\Delta T = 2,09$  °C,  $\Delta TD = 2,8$ °C; Sn + 60 вес. % Pb, скорость охлаждения 0,09 °C/c, x 750



**Рис. 11.** Диффузионное переохлаждение ликвата близко к максимальному. В этот период эволюции двухфазной зоны существовали условия развития самых мелких элементов дендритной структуры сплава – осей четвертого порядка.  $\Delta T = 4,3$  °C ,  $\Delta TD = 8$  °C; Sn + 60 вес. % Zn, скорость охлаждения 0,09 °C/c

Строение кристаллической части двухфазной зоны, соответствующей малым значениям («хвосту») на кривой диффузионного переохлаждения в двухфазной зоне показано на рис. 12 и рис. 13. Этой стадии этапа кристаллизации элементарного объема двухфазной зоны присуще изменение характера дендритного роста в двухфазной зоне, связанное с образованием, против прежних, округлых форм, слиянием отдельных элементов структуры, их трансформацией.



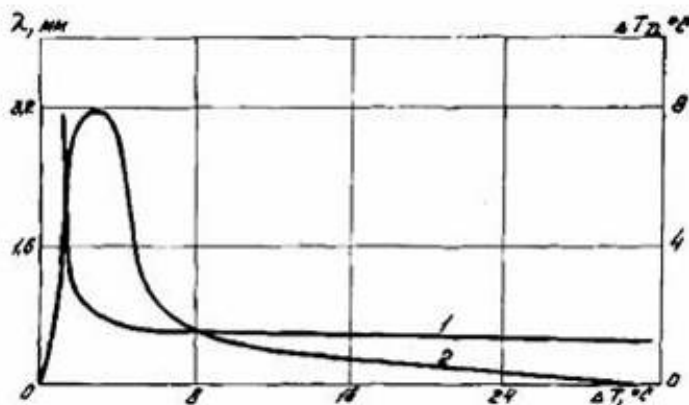
**Рис. 12.** Структура дендритной составляющей двухфазной зоны в период замедленного (вне «купола») изменения диффузионного переохлаждения ликвата.

Начало «огрубления» структуры.  
 $\Delta T = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta TD = 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Sn + 60 вес.% Pb, скорость охлаждения  $0,09 \text{ }^\circ\text{C/c}$ , x 560

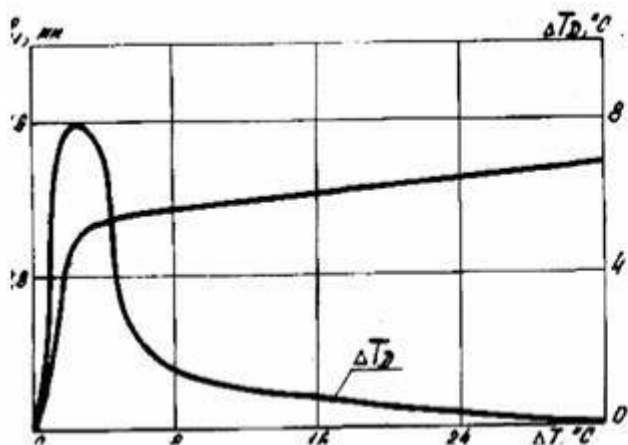
**Рис. 13.** Структура дендритной составляющей двухфазной зоны при дальнейшем уменьшении диффузионного переохлаждения ликвата.

Продолжение процесса «огрубления» структуры  $\Delta T = 24,26 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta TD = 0,75 \text{ }^\circ\text{C}$ , Sn + 60 вес.% Pb, скорость охлаждения  $0,09 \text{ }^\circ\text{C/c}$ , x280

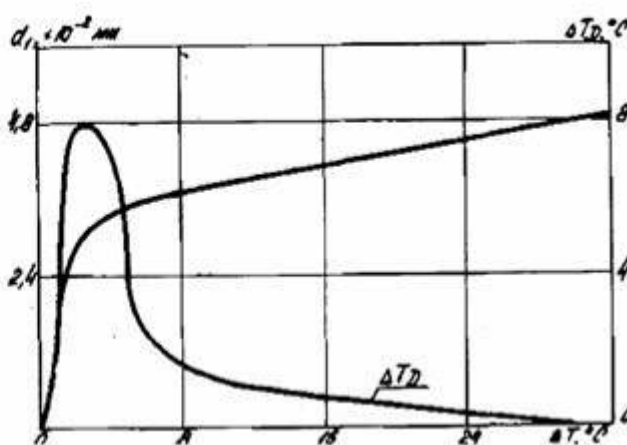
Анализ хода кривой диффузионного переохлаждения в двухфазной зоне, построенной в безразмерных координатах ( $\Delta TD/\Delta TD^*$ ,  $\Delta T/\Delta T^*$ ), где  $\Delta TD^*$  и  $\Delta T^*$  максимальное диффузионное переохлаждение в двухфазной зоне и интервал затвердевания соответственно позволяет ввести понятие «характеристическая температура двухфазной зоны» [6]. Это такая (безразмерная) температура двухфазной зоны, при (в малой окрестности) которой заканчивается формирование масштабных соответствий между элементами дендритной структуры, возникают самые мелкие элементы дендритной структуры двухфазной зоны. Эта температура разделяет качественно различные (типичные) участки как на зависимостях  $\Delta TD(\Delta T)$ , так и на зависимостях  $\lambda(\Delta T)$ ,  $li(\Delta T)$ ,  $di(\Delta T)$ , где  $\lambda$ ,  $li$  и  $di$  - средние значения параметров дендритной структуры (средние расстояния между дендритными ячейками (дендритами), длины осей различных порядков, толщины осей различных порядков).



**Рис. 14.** Связь кинетики образования среднего расстояния  $\lambda$  (кривая 1) между кристаллами с эволюцией  $\Delta TD$  (кривая 2) в элементарном объеме двухфазной зоны сплава Cd + 30 вес.% Zn. Скорость охлаждения  $0,12 \text{ }^\circ\text{C/c}$



**Рис. 15. Связь кинетики удлинения ствола дендрита с эволюцией диффузионного переохлаждения в элементарном объеме двухфазной зоны сплава Cd +30 вес.% Zn. Скорость охлаждения 0,12 °С/с**



**Рис. 16. Связь кинетики утолщения ствола дендрита с эволюцией диффузионного переохлаждения в элементарном объеме двухфазной зоны сплава Cd + 30 вес.% Zn. Скорость охлаждения 0,12 °С/с**

Рассмотрен метод изучения структурообразования в однородном (физически малом, элементарном) объеме двухфазной зоны модельных сплавов в отсутствии внешних воздействий. Полученные результаты показывают тесную связь кинетики развития дендритной структуры с величиной диффузионного переохлаждения в двухфазной зоне.

Установлен принцип подобия для изменения диффузионного переохлаждения при кристаллизации различных модельных сплавов.

Обоснована целесообразность введения понятия характеристической температуры двухфазной зоны.

Эти результаты позволяют считать данный метод перспективным в автомобильной промышленности для получения информации о формировании структуры металла и ее прогнозировании в процессах, связанных с воздействием на двухфазную зону.

#### Литература

1. Гришин В.В., Сосенушкин Е.Н., Французова Л.С. Теплообмен при штамповке кристаллизующегося металла и время затвердевания поковки, Автомобильная промышленность, № 12, 2006, с.34.
2. Чернов Д.К. и наука о металлах. Сб. Под ред. Н.Т.Гудцова, Металлургиздат, 1950.
3. Tiller W.A. J. of the Iron and Steel Inst., August, 1959, p.338.
4. Гуляев Б.Б. Литейные процессы, М., Машгиз., 1960.
5. Борисов В.Т. Кристаллизация бинарного сплава при сохранении устойчивости, ДАН, 1961, т. 136, № 3, с. 583.
6. Сулимцев И.И. Исследование диффузионного переохлаждения в двухфазной зоне затвердевающих бинарных сплавов и его роли в структурообразовании. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. М., 1977.

#### **Исследование прочностных, теплофизических и демпфирующих свойств анаэробных материалов**

д.т.н., проф. Тулинов А.Б., к.т.н. Гончаров А.Б.  
РГУТИС, ММК «Мосинтраст».

Основным показателем любого соединения с применением анаэробных продуктов является прочность соединения, зависящая, прежде всего, от свойств выбранной марки анаэробного продукта и размеров соединяемых поверхностей. Поэтому представляется возмож-