

УДК 548.5

А. П. Шпак, О. П. Федоров,
Е. И. Берсуский, Е. Л. Живолуб

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова, Київ

Некоторые
процессов
в
условиях
(создание
установки
МОРФОС)

проблемы
направленного
микрогравитации
исследования
затвердевания

Розроблено макет установки МОРФОС, призначений для наземного відпрацювання експериментів в галузі вивчення структури затвердіння при спрямованій кристалізації прозорих об'єктів. Проведена робота є етапом підготовки комплексного космічного експерименту, який дозволить виявити принципові особливості формування структури при спрямованій кристалізації в космічних умовах. Особливістю розробленого підходу є можливість досліджень монокристалів, вирощуваних в різних кристалографічних напрямках. Вважається, що зіставлення політичних і наземних даних, а також їхнє зіставлення з експериментом в квазідовимірному препараті дозволить визначити основні фізичні механізми впливу гравітаційної конвекції на структуроутворення кристалічних матеріалів, а також виробити рекомендації щодо методів впливу на цей процес в космічних умовах.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования кристаллизации в условиях невесомости принадлежат к числу приоритетов при постановке экспериментов на Международной космической станции (NASA Strategic Plan 2000; Proceedings of the Joint X European and VI Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity, St. Petersburg, 15—21, June 1997). Это дает основание прогнозировать определенный толчок в развитии физики процессов затвердевания в ближайшие годы. Международная космическая станция дает возможность многократно проводить эксперименты в различных модификациях, модернизировать экспериментальное полетное оборудование, корректировать подходы к осуществлению экспериментов в течение длительного времени функционирования МКС. Это позволит перейти от демонстрационных экспериментов, характерных для предыдущего этапа орбитальных исследований, к последовательному изучению физики процесса, а затем и технологии получения материалов методами затвердевания.

Особенностью готовящихся исследований на

МКС в области физики кристаллизации следует считать привлечение различных методик и объектов исследования для изучения различных сторон процесса кристаллизации. К ним относятся: исследования свободного роста кристаллов, направленная кристаллизация металлических, полупроводниковых и прозрачных модельных материалов, изучение особых структурных состояний при кристаллизации высоко переохлажденных расплавов. Следует ожидать, что будут получены ответы на актуальные вопросы об особенностях формообразования, захвата примесей и включений, потери устойчивости фазовой границы в специфических условиях тепломассопереноса в условиях микрогравитации. Особый интерес вызывают эксперименты, которые предполагают совместное исследование фазовой границы и гидродинамических потоков в объеме расплава и вблизи фазовой границы. Отметим, что акцент на фундаментальных основаниях затвердевания совершенно оправдан и с точки зрения практических применений. Опыт предыдущих лет показал, что попытки осуществить производство уникальных материалов без фундаментальных исследований

физических основ процессов терпят неудачу.

Среди отмеченных направлений исследований заметное место принадлежит экспериментам с прозрачными веществами, которые часто используются для изучения свободного роста кристаллов и выращивания в поле температурного градиента. Высокая информативность, возможность прямого наблюдения динамики процесса, низкое энергопотребление и массогабариты, сравнительная легкость поддержания заданных температурных условий делают такие эксперименты весьма перспективными для фундаментальных исследований на орбите.

В настоящей работе рассмотрены некоторые актуальные задачи физики затвердевания в невесомости, приведены результаты разработки методики исследования направленной кристаллизации прозрачных веществ в условиях орбитального полета, а также кратко изложены результаты наземных исследований. В работу вовлечены институты Национальной академии наук Украины: Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова (постановщик экспериментов), Институт электросварки им. Е. О. Патона (разработчик основной части экспериментального оборудования); Государственное научно-исследовательское предприятие «Украинский технологический центр оптического приборостроения» (разработчик оптических систем); предполагается участие московского института ЦНИИМАШ (с кооперацией российских исполнителей) в постановке экспериментов и создании части исследовательской аппаратуры.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Направленное затвердевание прозрачных расплавов дает уникальную возможность проследить динамику структурообразования материалов в процессе их получения в космосе. Это позволяет доступными экспериментальными методами ответить на принципиальные вопросы космического материаловедения, а также существенно повысить уровень понимания роли гравитационной конвекции в структурообразовании. При этом решаются две группы проблем. Первая связана с получением прямых экспериментальных данных об изменении характерных параметров фронта кристаллизации в космосе по сравнению с земными условиями (критические скорости потери устойчивости плоского фронта V , межъячеистые и междендритные расстояния λ , особенности захвата примесей и включений). Вторая, более общая, группа проблем связана с физической картиной влияния потока расплава на морфологию фронта кристаллизации; в этом контексте возникает и обратная задача влияния морфологии фронта на поток, т. н. проблема связанной

конвективно-морфологической неустойчивости. С точки зрения физического подхода космический эксперимент — это частный случай кристаллизации в специфических условиях тепломассопереноса в невесомости.

В эксперименте МОРФОС применяется метод Бриджмена для исследования фронта кристаллизации прозрачных органических объектов. Ампула с исследуемым веществом перемещается в поле температурного градиента; при этом в расплаве отсутствуют (или очень малы) свободные поверхности, которые обуславливают конвекцию Марангони. Следует ожидать поэтому, что температурные и концентрационные условия на фронте будут полностью определяться диффузионными процессами в космосе и сильно зависеть от гравитационной конвекции в земных условиях. Сопоставление наземных и полетных данных будет для данного случая весьма продуктивным.

Рассмотрим кратко основные факторы, а также измеряемые морфологические параметры, чувствительные к уровню конвективного перемешивания, которые будут исследоваться в ходе космического эксперимента.

Критическая скорость потери устойчивости плоского фронта. Конвективное перемешивание существенным образом влияет на условия возникновения возмущений на плоском фронте и формирование ячеек. Согласно [4, 12] конвекция расширяет область устойчивого роста, вместе с тем этот же фактор приводит к формированию макронеоднородностей в распределении примесей вследствие специфической конфигурации потоков расплава перед фронтом. Изучение эффекта потери устойчивости при отсутствующем перемешивании расплава на земле затруднительно; так, при использовании квазидвумерного препарата возникает нежелательное воздействие стенок образца; в объемных образцах в поле температурного градиента, антипараллельного вектору силы тяжести, возникают потоки, вызванные радиальным температурным градиентом.

Дендритный (ячеистый) параметр. Дендритный (ячеистый) параметр λ определяет распределение примесей за фронтом кристаллизации и, тем самым, микросегрегационную и (в определенной степени) дефектную структуру кристаллического материала. Зависимость этого параметра от условий выращивания (включая параметры потока расплава) — объект многочисленных исследований на Земле и в космосе [2, 7, 10, 14].

Для дендритной стадии роста справедлива эмпирическая зависимость, которая получила и теоретическое обоснование:

$$\lambda = aG^{-1/2}V^{-1/4},$$

где G — температурный градиент, V — скорость выращивания кристалла.

Для ячеистого роста функции $\lambda = \lambda(G, V)$ могут иметь различный вид, в зависимости от того, какого типа бифуркация имеет место вследствие потери устойчивости плоского фронта. Для субкритической бифуркации некоторые теории предсказывают параболическую или эллиптическую форму ячеек. Для суперкритической бифуркации (уплощенные ячейки [8]) форма фронта не задается априори, а последовательно вычисляется. Исследования в космосе позволяют получить зависимости величины $\lambda(V)$ в условиях, контролируемых диффузией и дают возможность корректно сопоставить теорию с экспериментом. Так, в работах [9, 11, 13] приведены зависимости $\lambda(V)$, полученные в полетных условиях на шаттлах с использованием прозрачных сплавов; эти данные показывают удовлетворительное согласие с теорией, развитой в [8].

Кристаллографическая ориентация выращивания. До сих пор в полетных экспериментах изучались поликристаллические прозрачные материалы, что не позволяет корректно выявлять влияние ориентации выращивания на морфологию фронта; кроме того, границы зерен, являются мощным возмущающим фактором и вносят существенные искажения в картину возникновения и развития неустойчивости плоского фронта.

Некоторые постановщики экспериментов считают, что кристаллографическая анизотропия не влияет на морфологию фазовой границы [9] металлов и металlopодобных органик с ГЦК та ОЦК структурой решетки. Однако ростовые структуры, полученные при изучении металлических монокристаллов [7], а также морфология фронта прозрачных органик в квазидвумерных образцах указывают на количественные и качественные изменения в морфологии фронта в зависимости от ориентации выращивания. В частности, для ориентаций $<100>$ и $<110>$ обнаруживаются равносные и удлиненные ячейки соответственно, а в случае эксперимента в плоских препаратах установлена эмпирическая зависимость параметра λ от угла φ отклонения ориентации выращивания от $<100>$ [15]:

$$\lambda = \lambda_0 / \cos\varphi,$$

Отметим, что разворот ячеек в направлении ориентации преимущественного роста $<100>$ происходит в течение определенного времени, зависящего от скорости выращивания. По существу происходит постепенное приближение к равновесной структуре затвердевания. Скорость этого процесса определяется диффузионными процессами в приграничной области и существенно зависит от конвективного массопереноса.

Связанные конвективно-морфологические неустойчивости. Расплав, который движется перед

фронтом кристаллизации, оказывает влияние на условия потери устойчивости плоского фронта и параметры ячеек и дендритов. В свою очередь, форма искаженного фронта воздействует на поток в расплаве. Изучение этого явления началось сравнительно недавно [3] и требует последовательного экспериментального изучения в различных условиях перемешивания расплава.

Отметим, что в простейшем случае возникновения плоского потока расплава перед фронтом в объемном образце имеет место асимметрия структуры фронта, связанная с концентрационным градиентом вдоль поверхности фронта [13]:

$$dy/dx = 1/C_x D/V(1 - k)dC_x/dx,$$

где C_x — концентрация примеси вдоль фронта, D — коэффициент диффузии, k — коэффициент распределения. Таким образом, вследствие гравитационной конвекции ячеистая (или дендритная структура) становится функцией координаты фронта.

Рассмотрены и более сложные следствия влияния потока на процесс потери устойчивости, формирования неустойчивой (ячеистой и дендритной морфологии) фазовой границы. В частности, показано, что поток вызывает новые моды возмущения плоского фронта [3], может провоцировать макронародности (впадины) на фазовой границе.

Акустические воздействия на процесс затвердевания. Проблема управления структурой затвердевания в земных и полетных условиях — одна из наиболее актуальных. Для космических условий необходимость специальных воздействий обусловлена необходимостью компенсации остаточных микроДискорений и т. н. j - jitter. Вибрационные и ультразвуковые воздействия применялись в случае различных технологий получения материалов методами кристаллизации [1]. Отметим, что в случае выращивания кристаллов методом Чохральского успешно развиваются способы вибрационного воздействия на расплав. В случае космического эксперимента необходимость исследования такого рода можно рассматривать с двух сторон: как способ учета нежелательных вибраций на борту орбитальной лаборатории и как перспективный метод активного воздействия на структуру затвердевания.

Постановка экспериментов на борту орбитальной станции предполагает решение некоторых аспектов перечисленных проблем путем последовательного сопоставления данных на Земле и в космосе. Установка МОРФОС предназначена для прямого наблюдения за фронтом кристаллизации в объемном цилиндрическом образце. Предполагаются также параллельные исследования кристаллизации в квазидвумерных (плоских) препаратах, где конвекция практически отсутствует, но имеются ограничения

обусловленные поверхностными эффектами; такие эксперименты необходимы для определения круга задач, которые могут быть решены на земле в лабораторных условиях.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МОРФОС

Установка предназначена для выращивания кристаллов прозрачных модельных веществ путем направленной кристаллизации при непосредственной видеорегистрации в течение процесса выращивания морфологии границы раздела твердой и жидкой фаз в условиях микрогравитации.

В состав установки МОРФОС входят рабочий блок и система управления и энергопитания;

Основные технические характеристики установки приведены в таблице.

Основная часть установки — рабочий блок (рис. 1 и 2) — предназначен для реализации процесса выращивания монокристаллов и содержит:

- градиентное устройство;
- образец с прозрачным веществом;
- механизм перемещения;
- блок оптической системы.

Рабочий блок помещен в защитную камеру, закрепленную на основании, которое размещается на виброизолированной платформе. Конструкция защитной камеры установки должна обеспечить заданный температурный режим работы в стандартных лабораторных условиях и минимизацию воздушных потоков внутри камеры, в том числе и конвективных (в наземных условиях).

Градиентное устройство предназначено для создания линейного температурного градиента вдоль оси цилиндрического образца; состоит из электрического резистивного нагревателя и полупроводникового холодильника цилиндрической формы, закрепленных на одной оси с образцом. Предусматривается возможность изменять расстояние между ними. Диапазон регулируемых температур нагревателя — 40...100 °C, температур холодильника — 0...20 °C. Точность поддержания заданных темпе-

Основные технические характеристики установки МОРФОС

Энергопотребление установки	$U \Gamma \leq 100$ Вт
Предварительные габаритные размеры:	
СУЭП	250×300×400 мм
рабочего блока	350×400×600 мм
Масса установки	≤ 30 кг
Длительность одного процесса кристаллизации	≤ 15 ч

тур холодильника и нагревателя — не менее 0.05 K, при этом обеспечивается максимальное значение градиента температуры по длине образца в зоне фронта кристаллизации до 50 K/cm.

Образец представляет собой цилиндрическую трубку длиной до 200 мм, выполненную из стекла и заполненную прозрачным веществом. Конструкция кюветы обеспечивает проведение всех работ с образцом (подготовку затравочного кристалла, выращивание кристалла, комплексное наблюдение фронта кристаллизации и процессов вблизи фронта).

Механизм перемещения служит для передачи движения от привода на каретку с закрепленным на ней градиентным устройством. Скорость перемещения (скорость выращивания кристалла) выбирается в зависимости от запланированной программы эксперимента. В рабочем режиме диапазон скоростей 0.1—30 мкм/с, в транспортном режиме скорость перемещения не менее 1 мм/с. Точность поддержания скорости не менее 5 %.

Блок оптической системы предназначен для получения видеосигнала изображения фронта кристаллизации и областей кристалла, прилегающих к нему, непосредственно в процессе роста. Блок включает в себя телевизионную передающую камеру, блок фокусировки изображений, блок осветителей и обеспечивает наблюдение фронта кристаллизации сквозь зону расплавленного вещества в од-

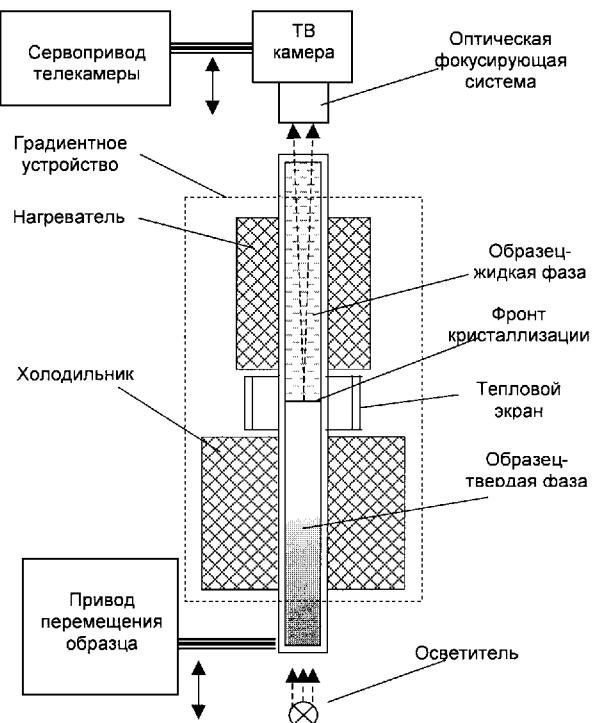


Рис. 1. Схема рабочего блока

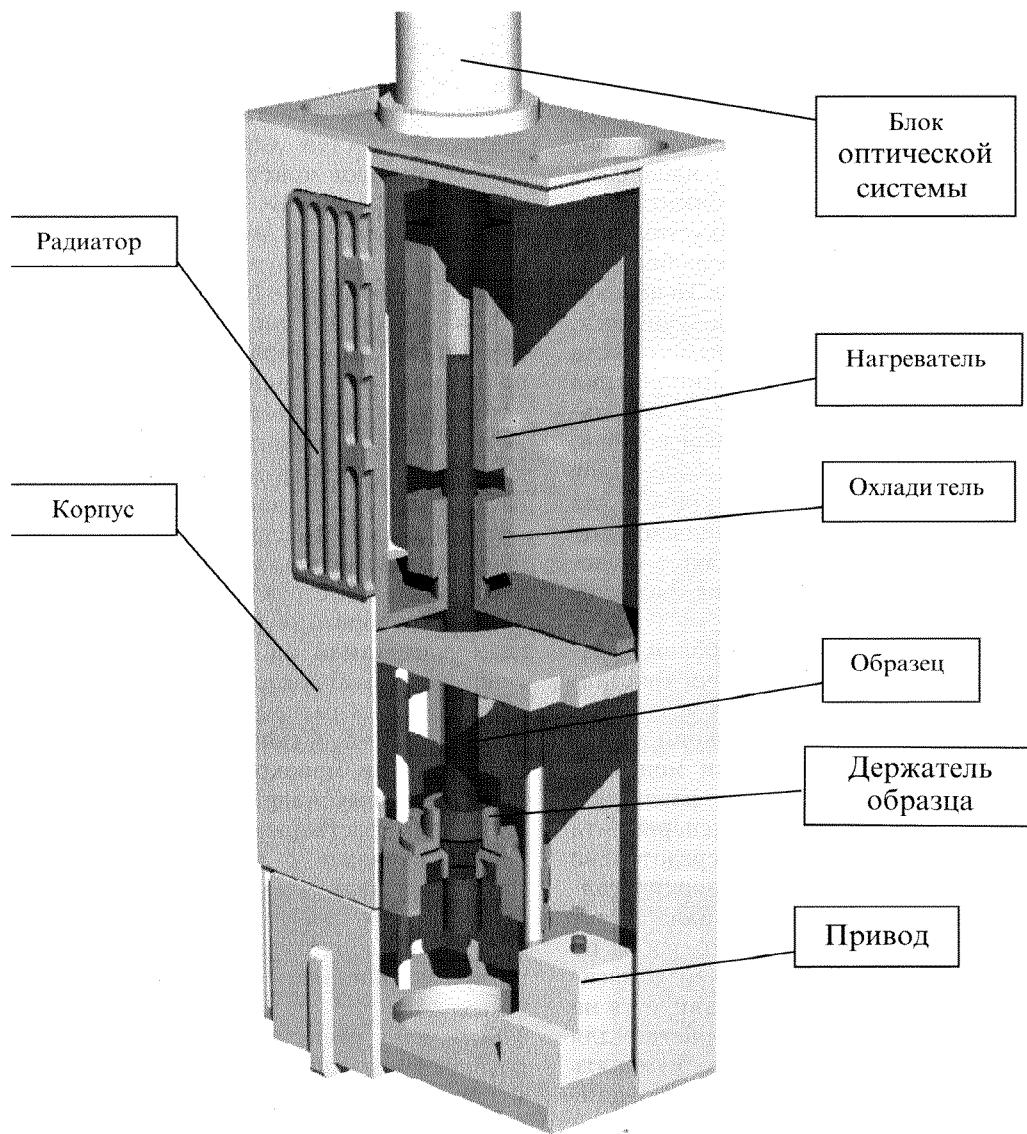


Рис. 2. Конструкция рабочего блока

ном из двух вариантов: либо вдоль оси образца сквозь горячий торец кюветы (при условии, что он плоский), либо под углом 30—60° к оси сквозь боковую стенку кюветы.

Процедура проведения эксперимента. В блоке кристаллизации (рабочем блоке) размещен держатель с образцом (ампула с исследуемым веществом), по его оси перемещается градиентное устройство (холодильник и нагреватель, выполненные в виде полых цилиндров, охватывающих образец); на этой же оси расположены с одной стороны осветитель, а с другой стороны — телекамера с оптической системой (объективом). В процессе работы образец остается неподвижным, а градиентное устройство, перемеща-

ясь с заданной скоростью, обеспечивает направленную кристаллизацию вещества, в ходе которой непрерывно работает система видеорегистрации. Телекамера с объективом отслеживает перемещение вдоль оси образца фронта кристаллизации, поддерживая фокусировку изображения.

Один из сценариев проведения эксперимента — это цикл, который, в свою очередь, состоит из нескольких повторных подциклов для данного образца с разными скоростями выращивания кристаллов. Эксперимент проходит в автоматическом режиме, вмешательство оператора предусматривается на стадиях предполетной подготовки, по завершении полета, а также при смене образца.

Предполагается несколько этапов создания и последующей модернизации установки МОРФОС. На этапе до 2004 г. предполагается создание полетной установки МОРФОС-1, основные характеристики которой приведены выше. В дальнейшем запланирована модернизация, которая позволит наблюдать и фиксировать потоки расплава вблизи фронта кристаллизации, а также изучать влияние акустических воздействий на процессы структурообразования.

Методика приготовления образцов. Используются прозрачные вещества, характеризующиеся, подобно металлам, нормальным механизмом роста и округлыми формами кристаллов (сукционитрил и его сплавы с ацетоном). Предполагается использовать и другие прозрачные вещества (бензофенон, тимол), имеющие гранные формы роста кристаллов (послойный механизм роста, характерный для большинства полупроводниковых материалов). Отметим, что до настоящего времени наиболее исследованной системой из указанных выше является сукционитрил—ацетон.

Для решения обозначенных выше проблем чрезвычайно важным является получение монокристаллических образцов. В частности, задача исследования роли кристаллографической ориентации может быть решена только при использовании монокристаллических затравочных кристаллов различной ориентации. Поэтому при подготовке эксперимента МОРФОС большое внимание было сосредоточено на разработке методики получения монокристаллов. Ориентация прозрачного монокристалла может быть определена на стадии дендритного роста по симметрии расположения боковых ветвей относительно дендритного ствола. Методика базируется на использовании профицированного устройства для прорашивания кристалла, позволяющего изменять направление роста исходного кристалла на заданный угол.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель первого этапа лабораторных исследований состояла в получении последовательности морфологических данных для монокристаллов сукционитрила при различных скоростях выращивания. Особое внимание уделялось принципиально важному для космических условий этапу потери устойчивости плоского фронта и переходу к ячеистой структуре. Использовались монокристаллические затравки ориентаций $<100>$, $<110>$ и $<111>$. Планируется получить монокристаллы, отклоненные от указанных ориентаций на 10° — 15° . Применялись скорости выращивания монокристаллов 0.5, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 мкм/с. Параллельно

изучались монокристаллы ориентаций $<100>$ и $<110>$ в плоских (квазидвумерных) препаратах. На рис. 3—5 показана типичная последовательность формы фронта кристаллизации в интервале указанных скоростей для объемных цилиндрических монокристаллов кристаллографической ориентации $<100>$, $<110>$ и $<111>$. На рис. 6 показана типичная последовательность формы фазовой границы для монокристалла того же вещества кристаллографической ориентации $<100>$ в плоском препарате.

Как видно из рис. 3, для ориентации $<100>$ характерна структура равносенных ячеек, близких по форме к гексагональным. Зависимости межъядерного расстояния λ от скорости роста анализируются двумя методами: нахождения среднего расстояния между центрами ячеек, а также методом построения графа наименьших расстояний (MST-методика [5]). Последняя позволяет оценить степень отклонения структуры ячеек от идеальной гексагональной структуры.

Во всех образцах различных кристаллографических ориентаций на начальной стадии потери устойчивости наблюдается образование нод (узлов) — хаотически расположенных по фронту углублений, рис. 3—5. Судя по картине оплавления (при протягивании монокристалла в направлении, противоположном направлению выращивания), ноды обогащены растворимыми примесями; это качественно совпадает с картиной, наблюдавшейся на монокристаллах алюминия и цинка [6], а также данными для некоторых металлов других авторов [7]. Эта же структурная особенность ранней стадии потери устойчивости наблюдается в плоских препаратах.

Отмечено существенное влияние конвективных потоков на распределение нод по поверхности фазовой границы. Структура нод, а также последующая ячеистая структура характеризуется определенной асимметрией (элементы неустойчивой структуры образуются на одном из краев образца и медленно покрывают всю поверхность фазовой границы в процессе выращивания). Качественные наблюдения за потоками перед фронтом (при помощи инородных частиц, движущихся в расплаве) указывают на то, что указанная асимметрия вызвана конвективными потоками в расплаве. Эти потоки, по всей видимости, обусловлены радиальным температурным градиентом, который может провоцировать конвекцию даже в случае антипараллельности векторов силы тяжести и температурного градиента.

Потеря устойчивости плоского фронта детально наблюдалась для ориентаций $<100>$, $<110>$ и $<111>$. В большинстве случаев развитие периодического возмущения начинается с ноды и представляет собой гребень волны (пучность), соединяющий соседние ноды. Со временем совокупность гребней

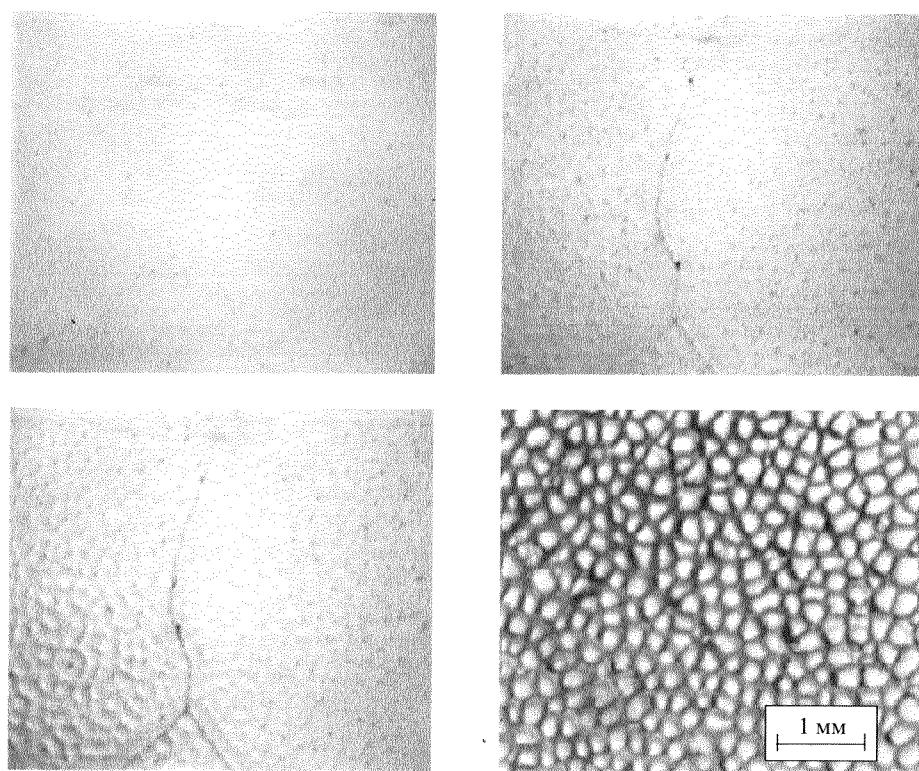


Рис. 3. Последовательные стадии потери устойчивости фронтом кристаллизации (сукционитрил, $<100>$; $R = 1.1 \text{ мкм/с}$, объемный препарат). Интервал между кадрами 1, 2, 3 — 30 мин, между 3, 4 — 60 мин

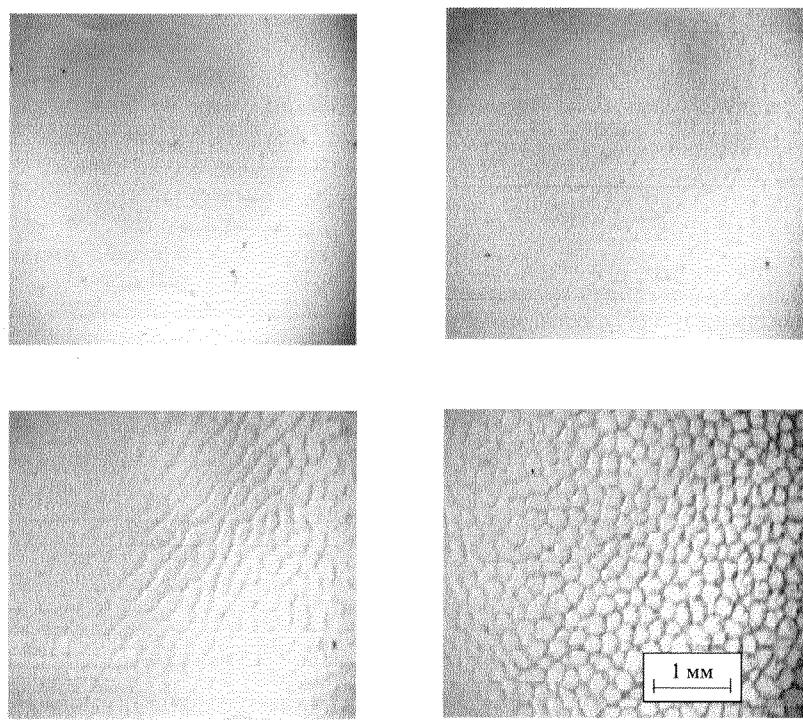


Рис. 4. То же, для направления $<110>$

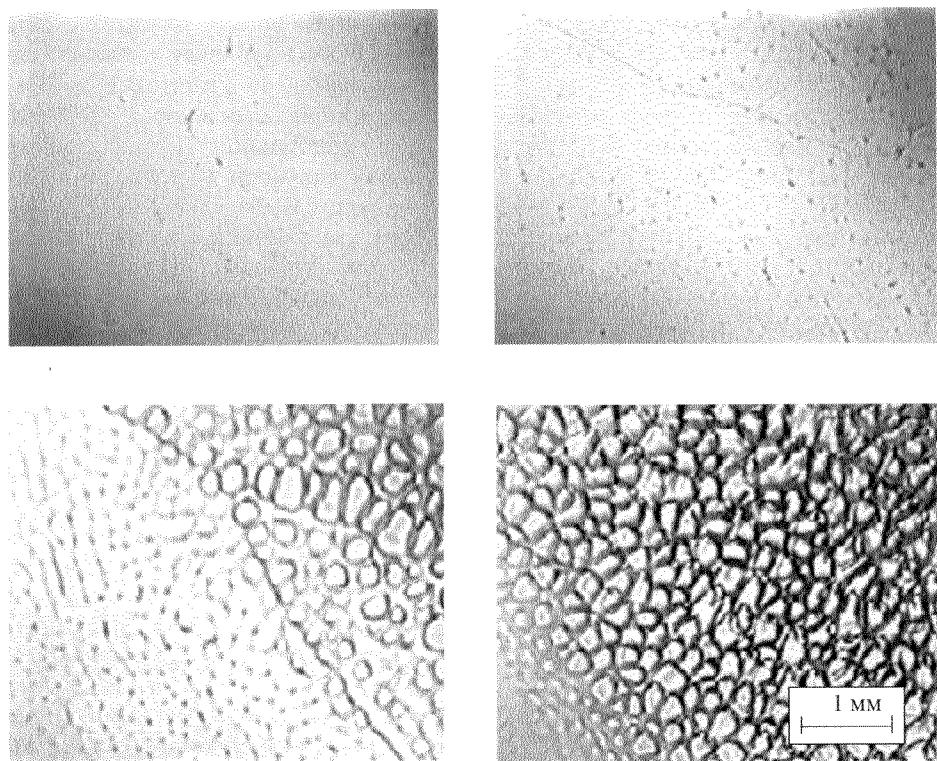


Рис. 5. То же, для направления $<111>$

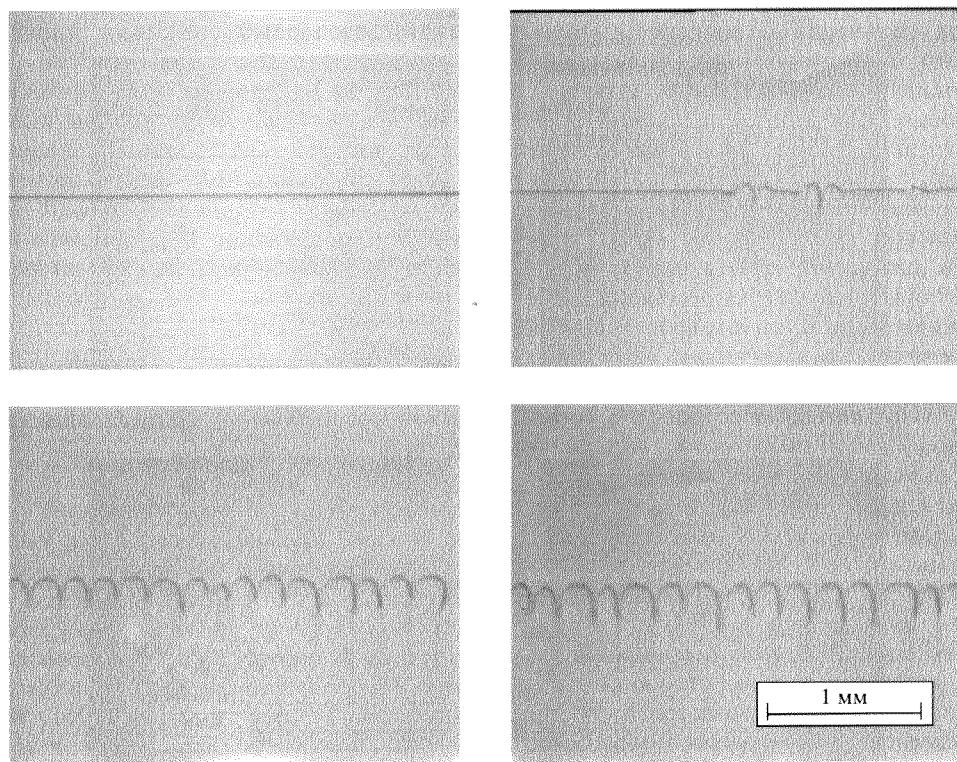


Рис. 6. Последовательные стадии потери устойчивости фронтом кристаллизации (сукционитрил, $<100>$; $R = 0.68$ мкм/с, квазидвумерный препарат). Интервал между кадрами 1, 2 — 60 мин, 2, 3 — 80 мин, 3, 4 — 140 мин

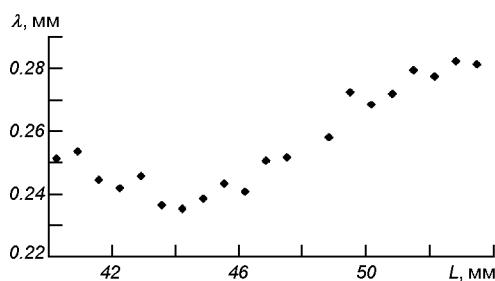


Рис. 7. Зависимость межячеистого параметра λ от положения фронта кристаллизации (сукцилонитрил, $<100>$; $R = 1.1$ мкм/с, объемный препарат). Начальное положение $L = 0$

формируется в структуру равноосных ячеек, относительно равномерно распределенных по поверхности фронта. Отмечались и отдельные случаи образования гребней волн на участках фазовой границы, свободной от нод. В обоих случаях результирующая структура оказывалась идентичной. Аналогичная картина образования периодического возмущения наблюдалась и в плоском препарате (рис. 6).

В случае выращивания монокристалла, не содержащего субграниц, в направлении $<100>$ равноосные ячейки распределены по поверхности хаотически, а признаков удлиненных ячеек не наблюдалось при всех применяющихся условиях выращивания.

Удлиненные ячейки характерны для ориентаций, близких к $<110>$. Причем в данном случае они образуются и в совершенном монокристалле, не содержащем субграниц.

Типичная временная зависимость межячеистого параметра λ для одной из скоростей выращивания в направлении $<100>$ представлена на рис. 7. Как видно, в процессе выращивания стационарные условия формирования ячеистой структуры не достигаются. Предварительные оценки указывают на влияние гравитационной конвекции на достижение стационарной структуры ячеистого фронта.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Создан макет полетной установки для исследования направленной кристаллизации прозрачных модельных веществ. Результаты наземных исследований показали, что установка позволяет решать широкий круг задач, связанных со структурообразованием в условиях микрогравитации. Прецизионные исследования морфологии фронта кристаллизации позволили выявить ряд новых эффектов, связанных с начальным этапом потери устойчивости, влиянием кристаллографической ориентации, а также с изучением условий стационарности при наличии и отсутствии гравитационной конвекции.

1. Абрамов О. В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. — М.: Металлургия, 1972.—256 с.
2. Billia B., Trivedi R. // Handbook of Crystal Growth 1, P. B.
3. Buhler L., Davis S. H. // J. Cryst. Growth.—1998.—186.—P. 629—647.
4. Coriell S. R., Hurle D. T. J., Sekerka R. F. // J. Cryst. Growth.—1964.—167.—P. 1.
5. Dussert C., Rasigni G., Rasigni M., Palmari J. Minimal spanning tree: A new approach for studying order and disorder // Phys. Rev. B.—1986.—34, N 5.—P. 3528—3531.
6. Fedorov O. P., Zhivolub E. L. Structure of metal single crystals grown in various crystallographic directions from melt // Crystallography Reports.—1998.—43, N 5.—P. 877—883.
7. Flemings M. Solidification Processing. — N. Y., 1974.
8. Hunt J. D., Lu S. // Metall. Mater. Trans.—1996.—27A.—P. 611.
9. Kauerauf B., Zimmerman G., Murmann L., Rex S. Planar to cellular transition in the system succinonitrile-acetone during directional solidification of a bulk sample // J. Cryst. Growth.—1998.—193.—P. 701—711.
10. Kauerauf B., Zimmerman G., Rex S., et al. Directional cellular growth of succinonitrile-0.075 wt % acetone bulk samples. Part 2: Analysis of cellular pattern // J. Cryst. Growth.—2001.—223.—P. 277—284.
11. Kauerauf B., Zimmerman G., Rex S., et al. Directional cellular growth of succinonitrile-0.075wt % acetone bulk samples. Part 2: Results of space experiments // J. Cryst. Growth.—2001.—223.—P. 265—276.
12. Mullins W. W., Sekerka R. F. // J. Appl. Phys.—1964.—33.—P. 444.
13. Noel N., Jamgotchian H., Billia B. In situ and real-time observation of the formation and dynamics of a cellular interface in a succinonitrile-0.5 wt % acetone alloy directionally solidified in a cylinder // J. Cryst. Growth.—1997.—181.—P. 117—132.
14. Noel N., Jamgotchian H., Billia B. Influence of grain boundaries and natural convection on microstructure formation in cellular directional solidification of dilute succinonitrile alloys in a cylinder // J. Cryst. Growth.—1998.—187.—P. 516—526.
15. Young G. W., Davis S. H., Bratkus K. // J. Cryst. Growth.—1987.—83.—P. 560.

SOME PROBLEMS IN THE INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION UNDER MICROGRAVITY (CREATING THE MORPHOS INSTALLATION)

A. P. Shpak, O. P. Fedorov, E. I. Bersuds'kyi, E. L. Zhyvolub

The MORPHOS installation for the ground-based study of solidification structure during directional crystallization of transparent substances is designed. The work performed is a stage of preparation of the integrated space experiment which will allow one to detect fundamental peculiarities of structure formation during directional crystallization under space conditions. The special feature of our approach is the possibility to investigate single crystals grown in various crystallographic directions. The comparison of flight and ground-based data as well as their comparison with the experiment in quasi-two-dimensional preparation will allow one to determine the basic physical mechanisms of gravity convection effect on structure formation of crystalline materials and to make some recommendations concerning methods of action on this process under space conditions as well.