

Е. Л. Живолуб¹, В. Н. Лариончик², Б. И. Перепеченко³, О. П. Федоров^{1,4}

¹ Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова Национальной академии наук Украины, Киев

² ЗАО «НПП «Техсис», Киев

³ Институт электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины, Киев

⁴ Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Киев

НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА МОРФОС-В — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ МОДЕЛЬНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СУКЦИНОНИТРИЛА

Приведены данные расчетов и экспериментальных исследований условий стационарности при направленной кристаллизации, а также результаты проектирования и макетирования отдельных узлов, блоков и вибросистемы установки МОРФОС-В.

Ключевые слова: фазовая граница, фронт кристаллизации, сукцинонитрил, математическое моделирование, линейная теория устойчивости, нестационарность, вибрационное воздействие, узел низкочастотной вибрации

ВВЕДЕНИЕ

Целью проведения космического эксперимента МОРФОС-В является разработка научных основ управления микросегрегационной структурой кристаллических материалов в космосе на основе применения методов направленной кристаллизации и наложения низкочастотной вибрации, получения прямых экспериментальных данных о закономерностях эволюции фронта кристаллизации прозрачных систем при различных параметрах выращивания и вибрационного воздействия в условиях микрогравитации.

Создаваемая экспериментальная полетная установка МОРФОС-В, позволяет проводить непрерывную видеорегистрацию фазовой границы в процессе выращивания кристалла в цилиндри-

ческом образце (метод Бриджмена). Исходя из целей исследования и программы экспериментов, предполагается получить результаты в следующих областях:

- устойчивость фазовой границы;
- влияние вибрации на эволюцию фронта кристаллизации;
- взаимодействие фронта кристаллизации с включениями другой фазы.

Области дальнейшего практического применения полученных научных результатов:

- апробация технологических условий получения на орбите монокристаллов различных веществ и сплавов с улучшенной структурой и свойствами;
- основы технологии получения искусственных композитов в условиях микрогравитации;
- технология литейного производства (уменьшение ликвации в слитках с дендритной структурой).

Ниже приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований, а также технологических работ по созданию установки МОРФОС-В за 2014 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ КРИСТАЛЛ – РАСПЛАВ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ

В настоящей работе проблема стационарности продвижения фронта исследуется на основе сопоставления экспериментальных данных с численным моделированием. Для получения надежных результатов принципиально важно отделить возможные аппаратные эффекты (непостоянство скорости протяжки образца, колебания температуры в рабочей камере) от собственно нестационарных процессов на фазовой границе. Единого достоверного метода такого рода исследований, очевидно, нет. В настоящей работе применяются два взаимно дополняющих метода. Прямые наблюдения за фазовой границей в прозрачном веществе позволяют непосредственно фиксировать фронт кристаллизации в строго контролируемых условиях. Параллельно проводился вычислительный эксперимент: получены решения нестационарной тепловой и диффузионной задачи при условиях, соответствующих эксперименту.

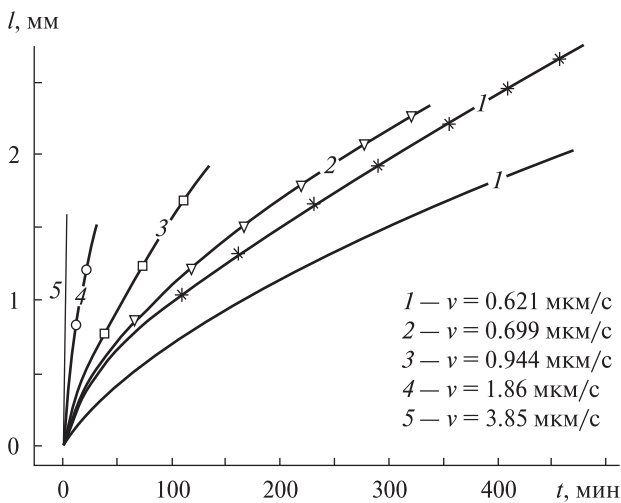


Рис. 1. Зависимость величины смещения устойчиво выращенного кристалла от скорости перемещения образца и градиента температуры на фронте кристаллизации (сплошная линия 1 — расчет для $v = 0.621$ мкм/с)

Наши наблюдения, а также расчеты показывают, что при типичных параметрах выращивания прозрачного сплава на основе сукцинонитрила стационарное состояние не достигается. Опыты со всеми исследовавшимися препаратами показывают, что фронт кристаллизации непрерывно смещается относительно изотермы, причем это смещение зависит от скорости выращивания. Расчеты показали, что причиной такой нестационарности не могут быть тепловые эффекты. Эта особенность тепловых процессов обусловлена тем, что в исследуемом диапазоне скоростей перемещения образца величина теплового критерия Пекле оказывается существенно меньше единицы.

Динамика продвижения фронта может быть описана следующим образом. При формировании кристалла в жидкой фазе вблизи фронта кристаллизации за счет сегрегации примеси образуется обогащенный диффузионный слой, размеры и состав которого изменяются во времени. Диффузионной характеристикой, ответственной за устойчивость плоского фронта в нестационарных условиях, является градиент концентрации примеси $\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=\xi(t)}$ в жидкой фазе на фронте кристаллизации. По мере роста кристалла градиент концентрации в расплаве монотонно возрастает, пока при определенном размере выращенного кристалла не достигает такого значения, при котором плоский фронт теряет устойчивость.

Пусть $T_{kr}^{(0)} = T^* + \alpha_L C_0$ — начальная температура кристаллизации, $T_{kr}(t)$ — текущая температура кристаллизации, соответствующая концентрации $C_{kr}(t)$ кристаллизации жидкой фазы на фронте фазового перехода в момент времени t . Обозначим через $\zeta(t)$ координату фронта кристаллизации с температурой $T_{kr}(t)$, а через $\eta(t)$ — координату изотермы $T_{kr}^{(0)}$. Поскольку $T_{kr}(t) < T_{kr}^{(0)}$, то $v_{kr} < v$ и, соответственно, $\eta(t) < \zeta(t)$, т. е. фронт кристаллизации «отстает» от изотермы $T_{kr}^{(0)}$. Величина смещения $l(t) = \eta(t) - \zeta(t)$ экспериментально определяется с высокой точностью и может выступать в качестве контролируемой характеристики нестационарного процесса кристаллизации.

На рис. 1 приведены экспериментальные и расчетные данные о величине смещения l , достигнутого к моменту потери устойчивости для различных скоростей v перемещения образца. Чем меньше v , тем большими оказываются величина смещения и протяженность устойчиво выращенного кристалла.

Результаты теоретической оценки величины смещения вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, и тем лучше, чем меньше v . Увеличение величины смещения при малых v свидетельствует о том, что разность температур ликвидус в начале и конце устойчивого роста кристалла возрастает при уменьшении скорости перемещения образца.

Сопоставление расчетов и эксперимента дает основание сделать следующие выводы:

1. Экспериментально и теоретически показано, что продвижение плоского фронта прозрачного сплава на основе сукцинонитрила при типичных условиях выращивания является существенно нестационарным. Наблюдалось непрерывное смещение положения фронта относительно изотермы, что количественно удовлетворительно описывается расчетом динамики накопления примеси перед фронтом.

2. Вследствие эффектов нестационарности в реальных экспериментальных условиях область параметров устойчивого роста (скорость, температурный градиент, концентрация) зависит от времени наблюдения и существенно ограничивает применимость линейной теории устойчивости фронта кристаллизации.

3. Полученные данные существенным образом влияют на задачу космических экспериментов по получению материалов. Они показывают, что в идеальных условиях выращивания возникает эффект нестационарности, обусловленный физическими процессами на фронте кристаллизации и не может быть устранен даже в условиях невесомости и реализации диффузионного режима роста.

Отсюда следует вывод о необходимости введения внешнего воздействия, которое бы нивелировало указанный негативный эффект и дало возможность получать в космосе материалы с улучшенными свойствами.

РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ БЛОКОВ И УЗЛОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ УСТАНОВКИ МОРФОС

Разработана конструкция *рабочего блока* (РБ), предназначенного для создания физических условий, исследования особенностей процессов направленной кристаллизации в условиях микрогравитации, согласно требованиям постановщиков космического эксперимента (КЭ).

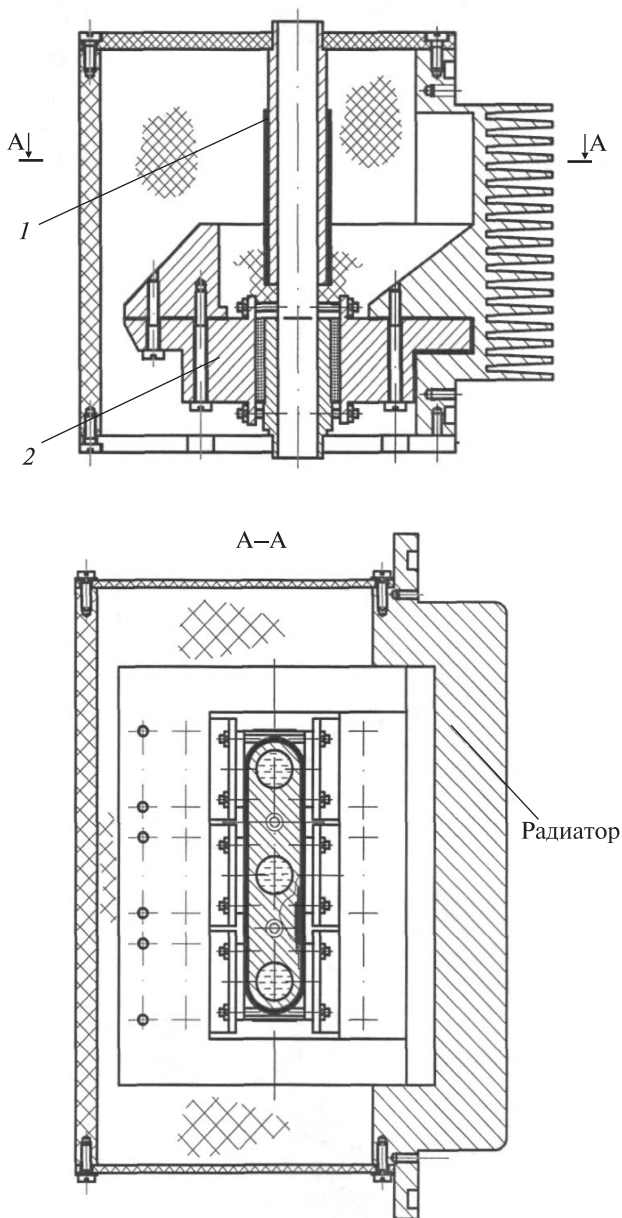


Рис. 2. Градиентное устройство: 1 — нагреватель, 2 — холодильник

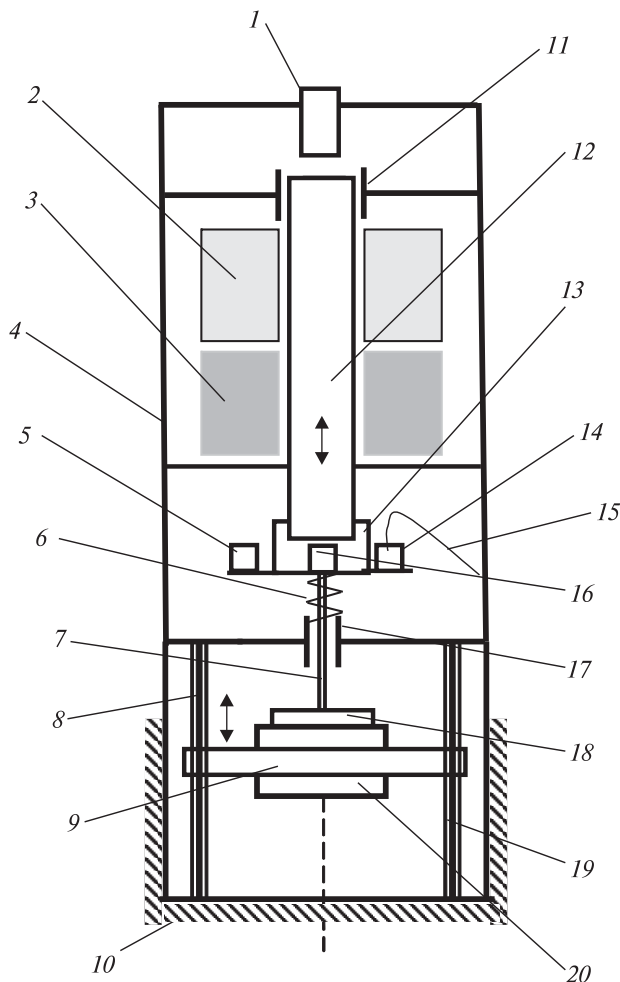


Рис. 3. Конструктивная схема ЭУ с ЭДВ: 1 — видеокамера, 2 — нагреватель, 3 — охладитель, 4 — корпус ЭУ, 5 — акселерометр, 6 — пружина регулировочная, 7 — ось контейнера, 8 — ходовой винт протяжки, 9 — подвижный кронштейн протяжки, 10 — основание ЭУ, 11 — направляющая контейнера верхняя, 12 — контейнер с модельным веществом, 13 — узел крепления контейнера, 14 — контактная колодка, 15 — токоподводы, 16 — светодиод подсветки, 17 — направляющая контейнера нижняя, 18 — подвижная катушка ЭДВ, 19 — направляющая протяжки, 20 — статор ЭДВ

В состав РБ введены блоки автоматики, драйвера шаговых двигателей перемещения каретки с образцами и видеокамер. Рабочий блок состоит из следующих основных узлов: градиентного устройства; блока видеокамер; герметичного кожуха; опорной плиты; привода перемещения образца.

При разработке конструкции РБ выполнены требования обеспечения трех степеней защиты от возможного токсического воздействия исследуемого вещества образца на жилую среду населенного отсека.

Первой ступенью защиты служит герметичная стеклянная оболочка образца. Вторую степень защиты обеспечивает герметичный кожух. Третья степень защиты обеспечивается за счет разницы давлений атмосферы в объемах РБ и населенного отсека станции, что достигается путем заполнения РБ сухим азотом через специальный заправочный клапан.

При разработке РБ были учтены результаты наземных испытаний макетных прототипов установки и данные касающиеся исследовательских образцов, полученные в ходе таких испытаний.

Градиентное устройство (рис. 2) предназначено для создания линейного температурного градиента вдоль оси нагревателя (диапазон регулируемых температур 40...100 °С) и холодильника (диапазон регулируемых температур 10...20 °С), которые имеют внутренние полости цилиндрической формы. Нагреватель и холодильник размещены соосно таким образом, что их полости образуют три параллельных канала для образцов. Нагреватель представляет собой алюминиевый корпус прямоугольного сечения с закругленными боковыми гранями, с тремя отверстиями для перемещения образцов. По периметру корпуса расположен резистивный нагреватель из фольги.

Охладитель представляет собой алюминиевую плиту прямоугольного сечения с тремя отверстиями, соосными с отверстиями нагревателя. На двух противоположных гранях расположены термоэлектрические модули, холодным спаем в сторону холодильника, а горячим — к радиатору.

С целью повышения качества изображений, получаемых от исследуемой области образцов, была проведена доработка блока видеокамер. Разработан блок, который позволяет проводить раздельную юстировку изображений от каждого из трех образцов.

Таким образом, каждая из трех видеокамер оснащена собственным приводом с ходовым винтом (обеспечивает ход каждой видеокамеры

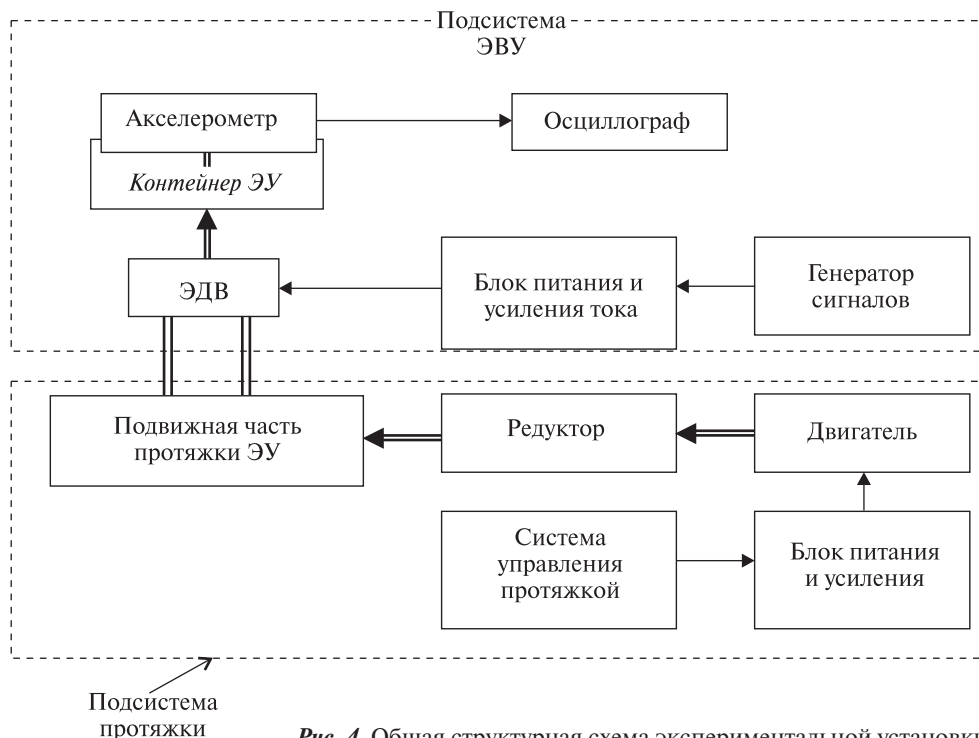


Рис. 4. Общая структурная схема экспериментальной установки

в пределах 30 мм) и блоком концевых выключателей. Система управления позволяет вести отдельную настройку резкости каждой камеры отдельно. Новая конструкция блока видеокамер — это исполнение его в виде отдельной конструкционной единицы с собственным электрическим подключением, что позволяет проводить его наладку и настройку его работоспособности без интеграции в установку.

Дальнейшей актуальной целью работы является изготовление, испытания и отработка отдельного фокусирования изображения исследуемой зоны каждого из трех образцов в процессе направленного затвердевания с использованием системы управления (ход каретки с образцами в пределах 60 мм).

Герметичный кожух рабочего блока, являющийся одной из ступеней безопасности, крепится к несущей опорной плите РБ посредством резинового уплотнения. Конструкция кожуха — сварная, выполнена из алюминиевого сплава. Корпус обрамлен гладкими плоскостями внешней поверхности. Все элементы коммутации с внешними

узлами установки (разъемы, заправочные клапаны) расположены на опорной плите.

Выпущен комплект рабочей документации основных узлов новой конструкции рабочего блока. Проведена детализовка корпуса рабочего блока, градиентного устройства и оптической системы.

УЗЕЛ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ

Узел низкочастотной вибрации предназначен для воздействия на расплав в цилиндрическом образце установки для выращивания кристаллов методом Бриджмена. При конструировании узла ставились задачи:

- создания макетного образца вибратора для возбуждения колебаний с разными параметрами в цилиндрическом контейнере лабораторного макета установки, предназначенной для выращивания кристаллов методом Бриджмена;
- создания аппаратных средств регистрации мгновенных значений виброускорения контейнера для определения параметров его колебаний: амплитуды, частоты и формы виброускорения.

На этапе проектирования было разработано техническое задание на работу и эскизная документация (ЭД) макетного образца вибратора в составе:

- эскизная документация механического блока — собственно вибратора, в том числе ЭД узла крепления контейнера и ЭД узла электродинамического вибратора (ЭДВ);
- эскизная документация электронных блоков вибратора (схемы блоков электрические принципиальные и монтажные, схемы соединений): блока подсветки, измерителя ускорения, усилителя тока и блока питания.

На основе разработанной ЭД были изготовлены детали и узлы, укомплектован макетный образец вибратора (один комплект): детали узла крепления контейнера, детали ЭДВ, блок подсветки, измеритель ускорения, усилитель тока, блок питания.

На заключительном этапе были проведены сборка, настройка и контрольные испытания макетного образца вибратора, интегрированного в состав экспериментальной установки (рис. 3, 4).

Технические характеристики изделия. Вибратор обеспечивает следующие параметры синусоидального виброускорения контейнера:

- частота в диапазоне от 5 до 40 Гц,
- амплитуда в диапазоне от 0.1 до 11 г.

Конструкция вибратора обеспечивает контроль в реальном времени на осциллографе формы, частоты и амплитуды виброускорения.

Измеритель виброускорения контейнера имеет минимальные массогабаритные характеристики: $20 \times 9 \times 6$ мм, масса — 250 г.

Конструкция измерителя виброускорения обеспечивает возможность его работы с необходимой точностью без калибровки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Методами моделирования и прямого наблюдения показана необходимость внешнего воздействия на кристаллизующийся материал, для устранения эффекта нестационарности при направленной кристаллизации в условиях невесомости. Оценены параметры необходимого воздействия и выбран метод низкочастотных вибраций. Спроектированы узлы и системы установки

МОРФОС, а также макет вибрационного блока для отработки режимов космического эксперимента.

Статья надійшла до редакції 15.12.14

Є. Л. Живолуб¹, В. М. Ларіончик³,
Б. І. Перепеченко², О. П. Федоров^{1,4}

¹ Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова
Національної академії наук України, Київ

² Інститут електродварювання ім. Є. О. Патона
Національної академії наук України, Київ

³ ЗАТ «НПП «Техсіс», Київ

⁴ Інститут космічних досліджень Національної академії
наук України та Державного космічного агентства
України, Київ

НАЗЕМНЕ ВІДПРАЦЮВАННЯ КОСМІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ МОРФОС-В — ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПОВЕРХНІ РОЗДІЛУ ФАЗ ПРИ СПРЯМОВАНОМУ ТВЕРДІННІ МОДЕЛЬНОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ СУКЦИНОНІТРИЛУ

Приведено дані розрахунків і експериментальних досліджень умов стаціонарності при спрямованій кристалізації, а також результати проектування окремих вузлів блоків та вібросистеми установки МОРФОС-В.

Ключові слова: фазова границя, фронт кристалізації, сукцинонітрил, математичне моделювання, лінійна теорія стійкості, нестационарність, вібраційний вплив, вузол низькочастотної вібрації.

Е. Л. Живолуб¹, В. Н. Лариончик³,
В. І. Перепеченко², О. П. Федоров^{1,4}

¹ G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³ CJC "R&PE "Tehsys", Kyiv

⁴ Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

GROUND TESTING OF SPACE EXPERIMENT MORFOS-V — AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERFACE DYNAMICS DURING DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF MODEL SUCCINONITRILE- BASED ALLOY

We present the results of our calculations and experimental studies of stationarity conditions in directional solidification, as well as the design and layout of individual nodes, blocks, and vibratory installation MORFOS-V.

Key words: Phase boundary, crystallization front, succinonitrile, simulation, linear theory of stability, non-stationary, vibration action, low vibration unit