

Сулицин А.В., Мысик Р.К., Голоднов А.И., Брусницын С.В.
Sulitsin A.V., Mysik R. K., Golodnov A. I., Brusnitsin S. V.

**ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МАКРО- И МИКРОЛИКВАЦИЮ
КАДМИЯ В СЛИТКАХ КАДМИЕВОЙ БРОНЗЫ**

VIBRATION INFLUENCE ON THE INVERTED-V-SHAPED AND DENDRITIC SEGREGATION OF CADMIUM IN INGOTS OF CADMIUM BRONZE



Сулицин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Mr. Andrey V. Sulitsin – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.



Мысик Раиса Константиновна – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Ms. Raisa K. Mysik – Doctor of Engineering, Professor, Department of the Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University, (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.



Голоднов Антон Игоревич – ассистент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Mr. Anton I. Golodnov – Assistant Lecturer, Department of the Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University, (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.



Брусницын Сергей Викторович – доктор технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

Mr. Sergey V. Brusnitsyn - Doctor of Engineering, Professor, Department of the Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University, (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.

Аннотация. В работе рассмотрено влияние вибрационной обработки расплава на ликвацию кадмия в слитках кадмиевой бронзы. В ходе исследований установлено, что вибрационная обработка расплава с частотой 25 Гц и амплитудой 0,4 мм снижает обратную и внутридендритную ликвацию кадмия в слитках кадмиевой бронзы.

Summary: The paper is concerned with the influence of vibration treatment of melt on the inverted-V-shaped and dendritic segregation of cadmium in ingots of cadmium bronze. In the course of research it was



determined that vibration treatment of melt with the frequency of 25 Hz and amplitude of 0,4 mm decreases the inverted-V-shaped and dendritic segregation of cadmium in ingots of cadmium bronze.

Ключевые слова: вибрация, ликвация, кадмиевая бронза.

Key-words: Vibration, segregation, cadmium bronze

УДК 621.74:669.35.6

В настоящее время кадмиевая бронза БрКд1 широко применяется в электротехнической промышленности, поскольку кадмий, присутствующий в этом сплаве, незначительно снижает теплопроводность и электропроводность меди, при этом значительно повышает ее прочностные характеристики [7; 3; 4]. Кроме того, эта бронза обладает способностью к искрогашению [5]. Из БрКд1 изготавливают контактные провода для электрифицированного транспорта, коллекторные пластины роторов и статоров электрических двигателей и генераторов, электроды сварочных машин, контакты высоковольтных электрических разъединителей и другие изделия электротехнического назначения [5].

Качество готовой продукции во многом определяется качеством исходных полуфабрикатов, а получение качественных слитков из кадмиевой бронзы в настоящее время сопряжено с большими технологическими трудностями. Прежде всего, это большая склонность сплава к обратной ликвации. Появление ликвата на поверхности слитков приводит к износу кристаллизатора и значительно снижает качество поверхности слитка. Учитывая тот факт, что научно-технический прогресс в отраслях промышленности, использующих медные сплавы, требует непрерывного повышения качества деформированных полуфабрикатов, весьма актуальным является исследование ликвационных процессов и определение реальных путей снижения неоднородности слитка по химическому составу.

Вопросы ликвации на протяжении многих лет являются предметом пристального внимания исследователей. М. Флеминг, рассматривая вопросы макроликвации, считает, что основной причиной ликвации в отливках и слитках является перемещение жидкой и твердой фаз в двухфазной твердожидкой зоне [9]. Таким образом, существенную роль в процессе распределения примесей играет характер кристаллизации. Объемный характер кристаллизации и снижение величины зерна будут способствовать подавлению ликвационных процессов.

В настоящее время известно несколько способов воздействия на расплав в процессе кристаллизации: введение в кристаллизующийся расплав микрохолодильников, электромагнитное перемешивание, вибрационная обработка и др. Наиболее технологичным способом воздействия при литье заготовок является вибрационная обработка. Эксперименты, проведенные нами ранее [8], показали, что при воздействии вибрации на кристаллизующуюся бронзу марки БрКд1 с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм удается значительно уменьшить среднюю площадь сечения зерна в структуре слитков кадмиевой бронзы БрКд1. При этом в работе [8] не рассматривалось изменение размера зерна по сечению слитка. Кроме того, неизученным осталось влияние вибрации на микроструктуру слитков из бронзы марки БрКд1. Поэтому на следующем этапе нашей работы было решено установить влияние вибрации не только на химическую однородность слитков из бронзы БрКд1, но и на равномерность макро- и микроструктуры по сечению слитка.

Испытания проводились при литье бронзы марки БрКд1. Плавка металла велась в печах ИЛК 1,6. Для создания вибрации в расплаве жидкой кадмиевой бронзы использовался вибростол (см. рис. 1).

Под действием механического вибратора 3 плита 2 совершает возвратно-поступательные движения в вертикальном направлении, при этом частота колебаний задается скоростью вращения электродвигателя, а амплитуда определяется эксцентриком, установленным на вал двигателя. Сверху на плиту устанавливали медную изложницу 5, предварительно подогретую до 250 °С. Жидкий металл, нагретый до температуры 1130 °С, заливали в изложницу, совершающую колебательные движения с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм. Вибрационную обработку прекращали после полного затвердевания слитка. В результате были

получены слитки диаметром 40 мм и высотой 55 мм. Для оценки эффективности вибрационного воздействия был залит контрольный слиток без наложения колебаний.

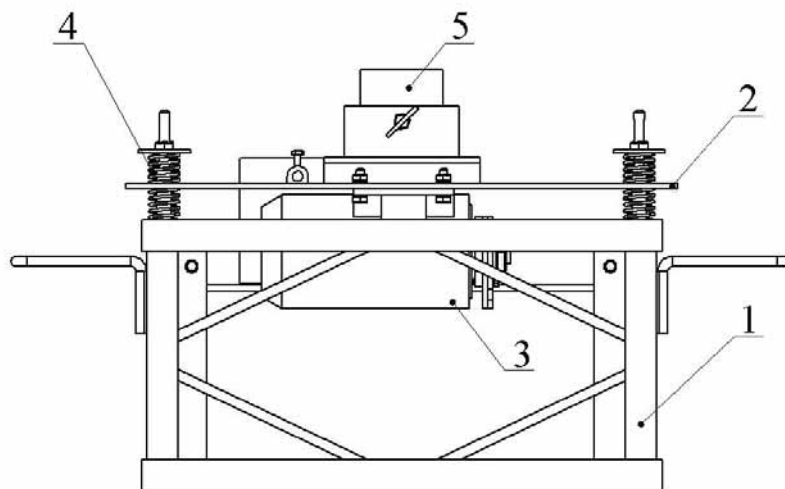


Рис. 1. Схема вибростола: 1 – основание; 2 – плита;
3 – вибратор; 4 – пружина; 5 – изложница

Слитки разрезали для выполнения металлографического исследования. Площадь зерна рассчитывали на каждом шлифе в семи различных точках, после чего все данные для каждой исследуемой области слитка усредняли. Расчет производили методом подсчета зерен для областей с мелкими равноосными кристаллами, а для областей с ярко выраженной столбчатой структурой – методом подсчета пересечений. Макроструктура полученных слитков представлена на рис. 2.



Без вибрации
 $Z = 75,7 \%$
 $S = 5,97 \text{ мм}^2$

С применением вибрации
 $\nu = 25 \text{ Гц}$, $A = 0,4 \text{ мм}$
 $Z = 0 \%$
 $S = 0,6 \text{ мм}^2$

Рис. 2. Макроструктура слитков кадмиевой бронзы

Для изучения дендритного строения литых образцов использовали оптический микроскоп LECO-SA 2000 со встроенной цифровой камерой SONY DVC-R500. Размер дендритной ячейки рассчитывали на каждом шлифе в девяти различных точках, после чего все данные для каждой исследуемой области слитка усредняли. Измерение размера дендритной ячейки осуществляли с помощью программного продукта SIAMS Photolab 700. Микроструктура слитков представлена на рис. 3 – 4.

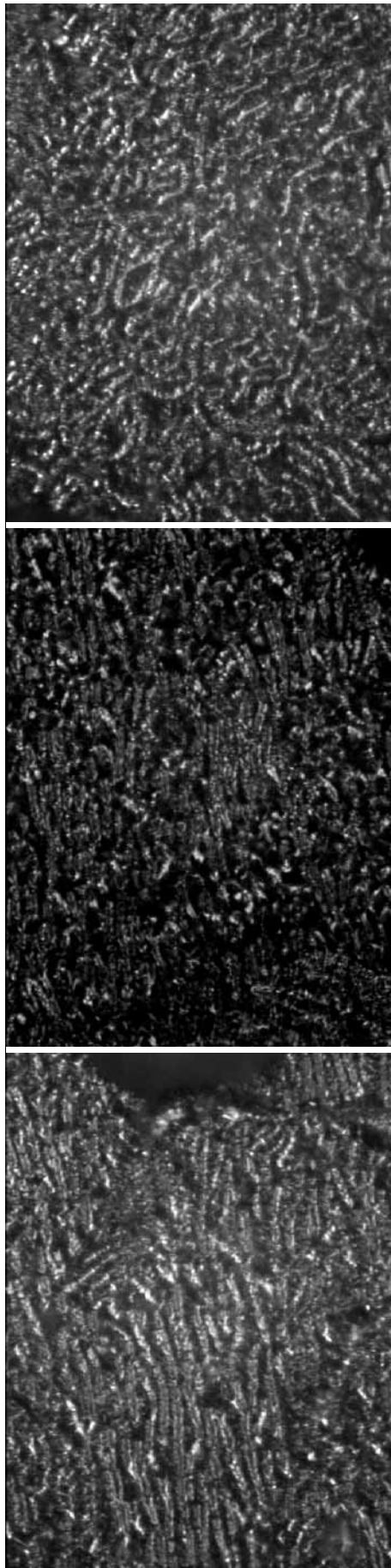


Рис. 3. Микроструктура слитка, отлитого без вибрационной обработки ($\times 1000$)

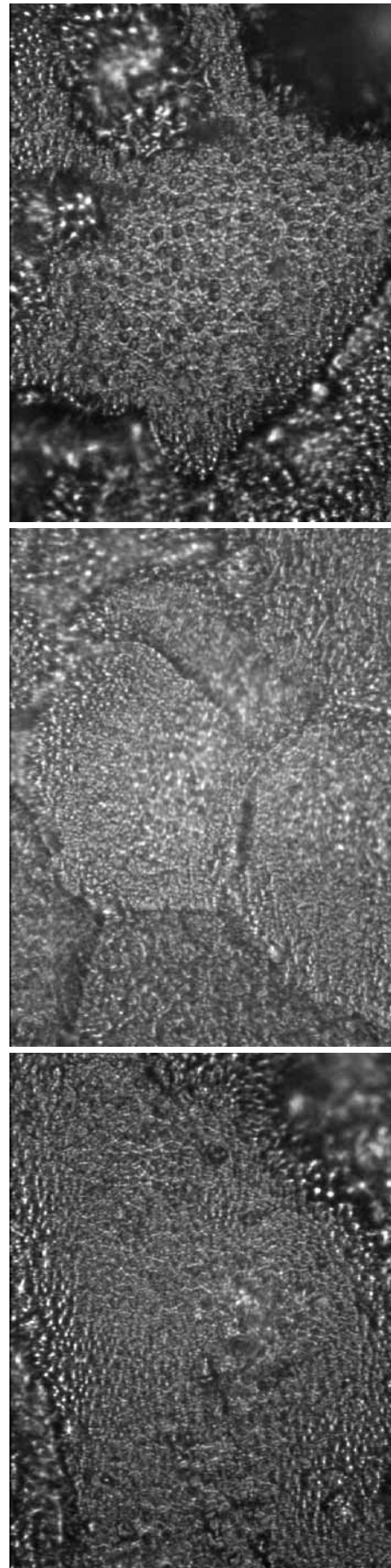


Рис. 4. Микроструктура слитка, отлитого под воздействием вибрации с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм ($\times 1000$)

Химическую однородность слитков исследовали по содержанию кадмия в пробах, отобранных послойной обточкой с усреднением навески для данного радиуса, атомно-абсорбционным методом с помощью спектрофотометра «Perkin-Elmer». Относительная погрешность анализа составляла $\pm 5\%$. Для оценки степени ликвации кадмия был использован приведенный коэффициент ликвации k , равный отношению содержания кадмия в данном слое к среднему для данного слитка. Результаты исследований представлены на рис. 5 – 7.

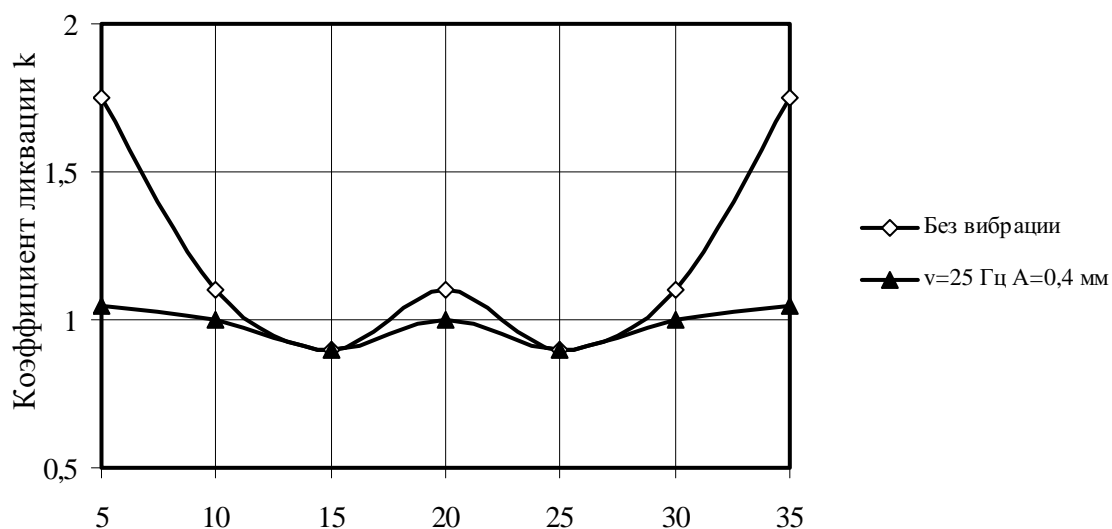


Рис. 5. Распределение кадмия по сечению опытных слитков бронзы БрКд1

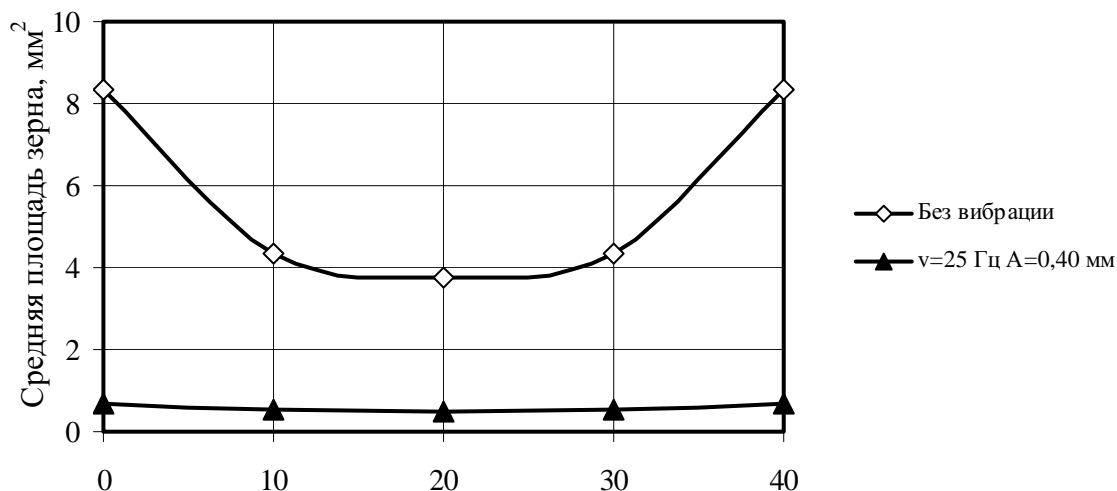


Рис. 6. Изменение средней площади макрозерна по сечению слитков бронзы БрКд1

Как видно из рис. 3 – 5, применение вибрации в процессе кристаллизации позволяет не только существенно измельчить макрозерно и дендритную ячейку, но и обеспечить химическую и структурную однородность слитка. Так, средняя площадь макрозерна по сечению контрольного слитка изменяется от 3,75 до 8,34 мм^2 , а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 0,84 до 1,31 мм^2 . Средний размер дендритной ячейки по сечению контрольного слитка изменяется от 4,65 до 10 $\mu\text{м}$, а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 1,65 до 1,81 $\mu\text{м}$. Коэффициент ликвации кадмия, характеризующий степень неоднородности хи-

мического состава, по сечению контрольного слитка изменяется от 0,9 до 1,75, а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 0,9 до 1,05.

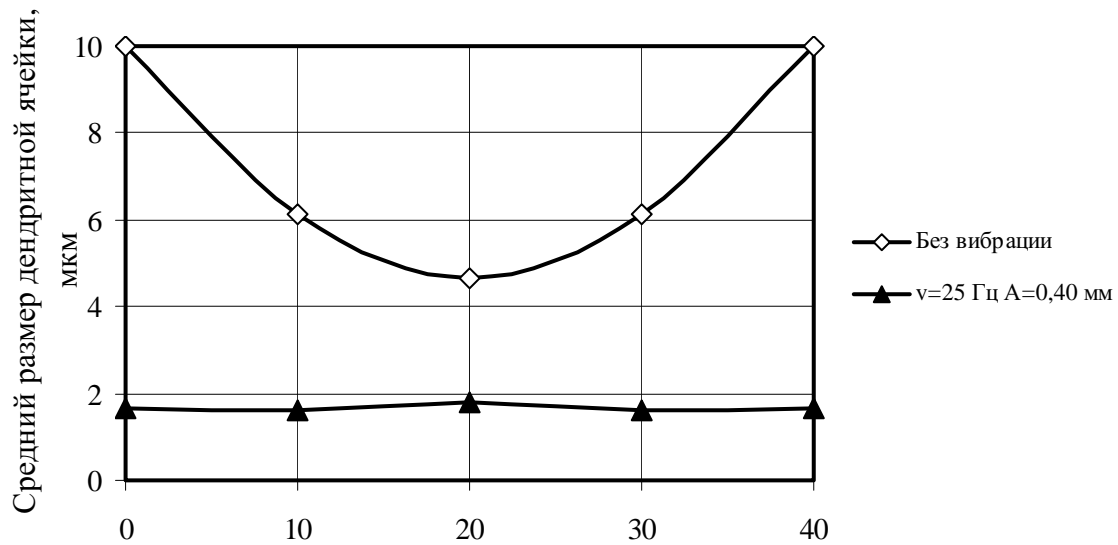


Рис. 7. Изменение среднего размера дендритной ячейки по сечению слитков бронзы БрКд1

Для изучения внутريدендритной ликвации кадмия использовали микрорентгеноспектральный анализ с помощью микроанализатора «САМЕВАХ». Микрорентгенограмма характеризует неравномерное распределение кадмия в сплаве БрКд1 с развитым дендритным строением, равноосной формой первичных кристаллов (см. рис. 8).

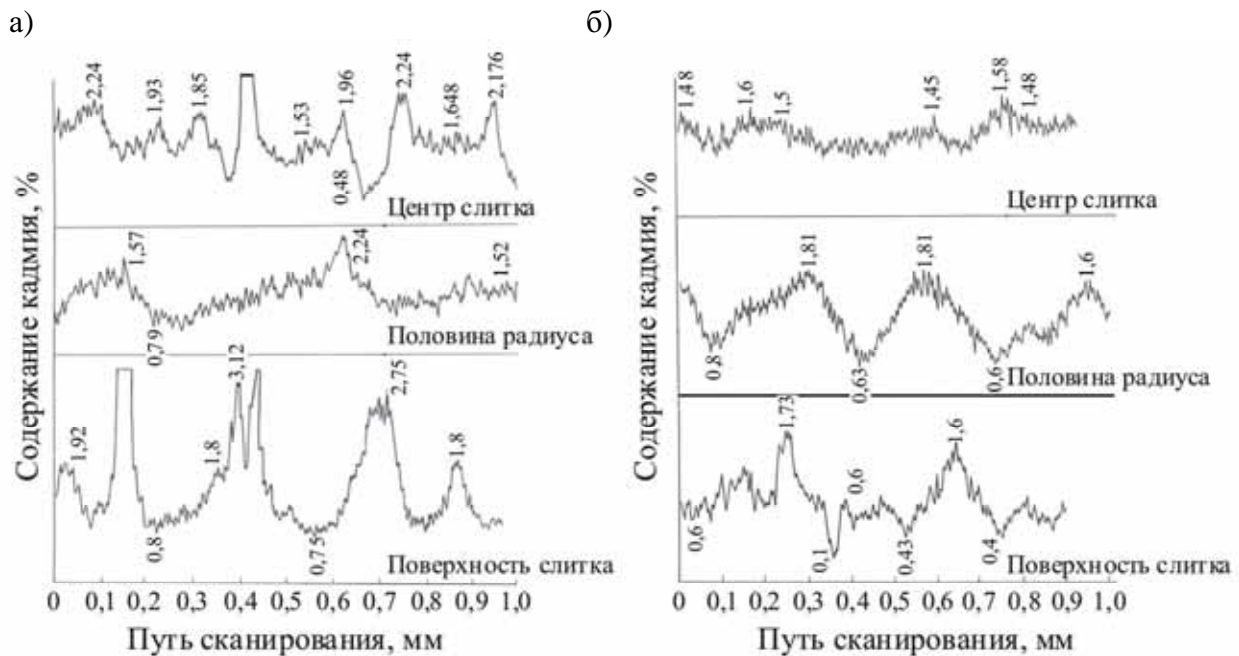


Рис. 8. Распределение кадмия по кристаллическому зерну: а – без вибрации; б – с применением вибрационного воздействия с частотой $v = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм

Поскольку большинство исследователей [2; 1; 6] считают, что основной причиной ликвации является движение жидкости через твердожидкую зону вследствие теплового сжатия, при усадке в процессе затвердевания и разности плотностей междендритной жидкости, положительное влияние вибрации на химическую однородность слитков из кадмиевой бронзы БрКд1 можно объяснить существенным изменением структуры слитков. Кроме того, вибрация, создаваемая в кристаллизующемся расплаве, способствует дополнительному перемешиванию расплава в лунке и усреднению химического состава во всем объеме жидкого металла.

Из рис. 8 видно, что междусные пространства в процессе затвердевания обогащены кадмием. Наблюдения показали, что при обычных условиях разливки микронеоднородность возрастает по мере приближения к поверхности слитка. При разливке сплава с применением вибрационного воздействия распределение кадмия более равномерное по сечению слитка. Подобный результат можно объяснить существенным измельчением микроструктуры слитков кадмиевой бронзы, что, безусловно, препятствует перемещению кадмия в твердожидкой зоне.

Работа выполнялась при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых Российских ученых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баландин, Г. Ф. Основы теории формирования отливок / Г. Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1979. – 336 с.
2. Гуляев, Б. Б. Затвердевание и неоднородность стали / Б. Б. Гуляев. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 228 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. ТП-3 / под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.
4. Николаев, А. К. Низколегированные медные сплавы. Особенности составов и технологии производства / А. К. Николаев // Цветные металлы. – 2001. – № 5. – С. 84-88.
5. Осинцев, О. Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справ. / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
6. Рыжиков, А. А. Теоретические основы литейного производства / А. А. Рыжиков. – Свердловск: Машгиз, 1953. – 287 с.
7. Смирягин, А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы / А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, А. В. Белов. – М.: Metallurgiya, 1970. – 364 с.
8. Определение оптимальных параметров вибрационного воздействия на бронзу марки БрКд1 в процессе кристаллизации / А. В. Сулицин, А. И. Голоднов, Р. К. Мысик, С. В. Брусницын // Литейщик России. – 2009. – № 10. – С. 43-47.
9. Флемингс, М. Процессы затвердевания / М. Флемингс. – М.: Мир, 1977. – 423 с.