

© А.В. Сулицин, Р.К. Мысик, А. И. Голоднов, С.В. Брусницын,  
И.А. Груздева, 2012 г.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
г. Екатеринбург

## **ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАДМИЯ ПО СЕЧЕНИЮ СЛИТКОВ БрКд1**

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

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 [1; 2; 3]. Кроме того, эта бронза обладает способностью к искрогашению [4]. 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 [4].

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. Флемингс, рассматривая вопросы макроликвации, считает, что основной причиной ликвации в отливках и слитках является перемещение жидкой и твердой фаз в двухфазной твердожидкой зоне [5]. 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 другие. Наиболее технологичным способом воздействия при литье заготовок является вибрационная обработка. Эксперименты, проведенные нами ранее [6], показали, что при воздействии вибрации на кристаллизующуюся бронзу марки БрКд1 с частотой  $\nu = 25$  Гц и амплитудой  $A = 0,4$  мм, удастся значительно уменьшить среднюю площадь сечения зерна в структуре слитков кадмиевой бронзы БрКд1. При этом в работе [6] 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 (рис. 1).

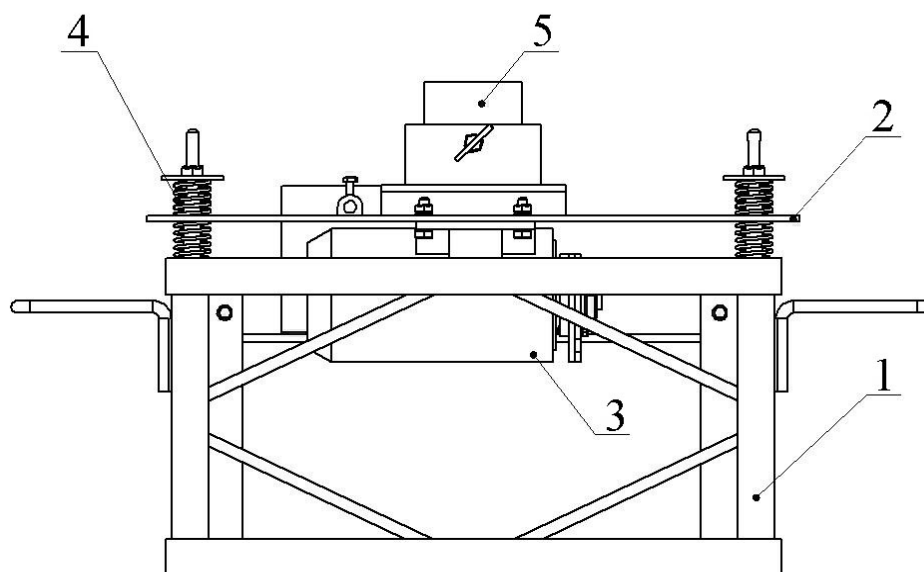


Рис. 1. Схема вибростола:

1 – основание; 2 – плита; 3 – вибратор; 4 – пружина; 5 – изложница

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.

Слитки разрезали для выполнения металлографического исследования. Площадь зерна  $S$  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. Кроме того, определяли долю столбчатых кристаллов  $Z$  в структуре бронзовых слитков. Макроструктура слитков представлена на рис. 2.

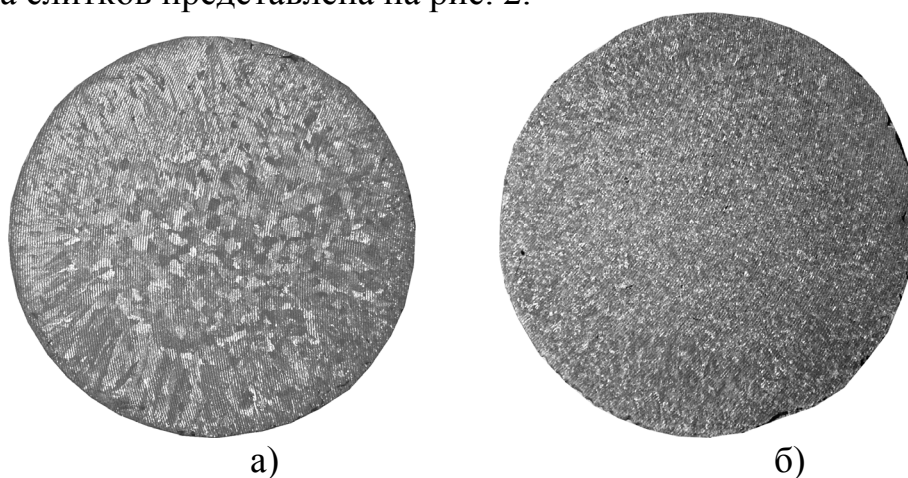
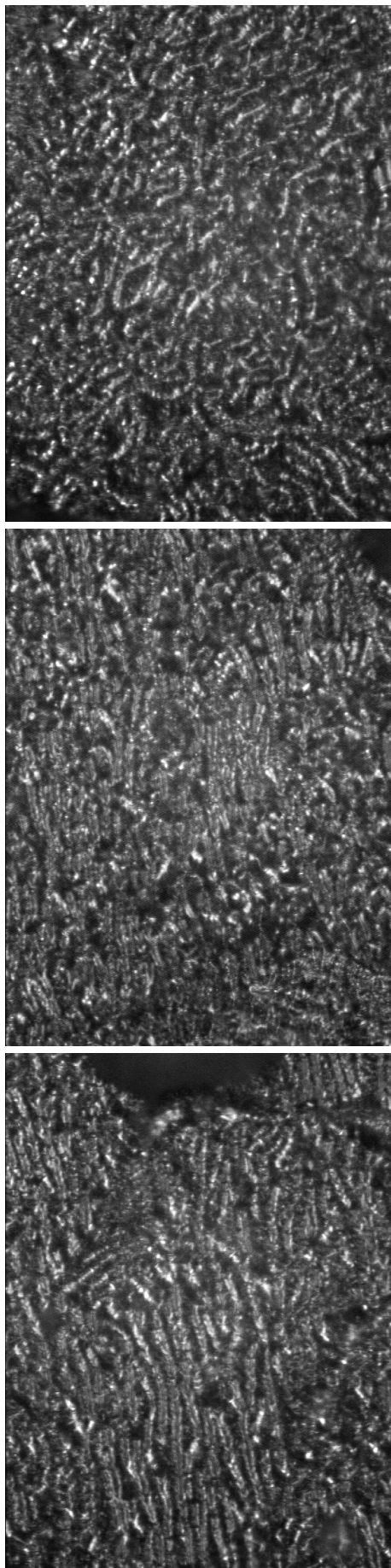


Рис. 2. Макроструктура слитков кадмиевой бронзы:  
а) без вибрации ( $Z = 75,7\%$ ,  $S_{\text{ср}} = 5,97 \text{ мм}^2$ ); б) с применением вибрации  $\nu = 25$  Гц,  $A = 0,4$  мм ( $Z = 0\%$ ,  $S_{\text{ср}} = 0,6 \text{ мм}^2$ )

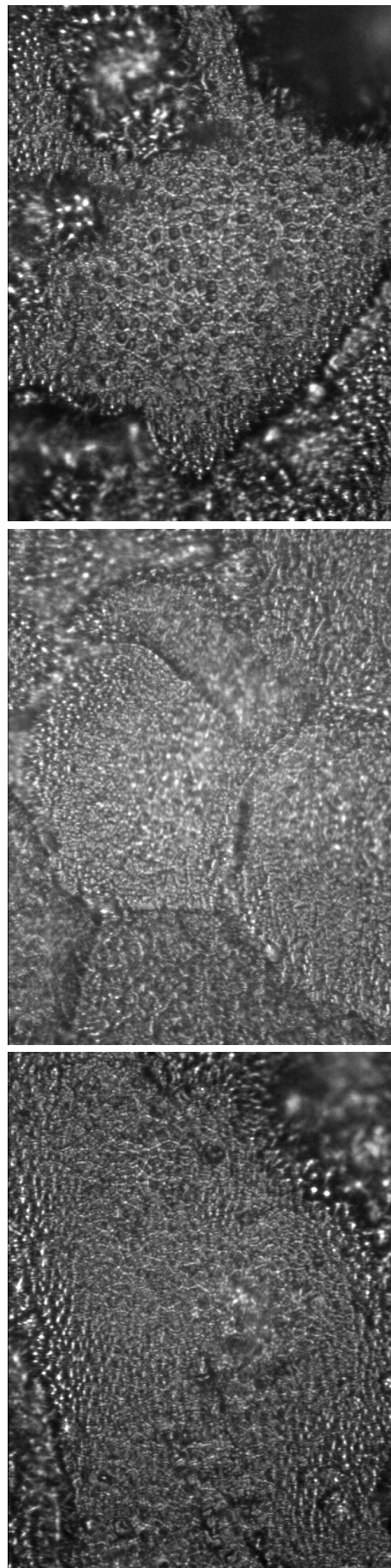
Для изучения дендритного строения литых образцов использовали оптический микроскоп LECO-SA 2000 со встроенной цифровой камерой SONY DVC-R500. Размер дендритной ячейки рассчитывали на каждом шлифе в девяти различных точках, после чего все данные для каждой, исследуемой области слитка усредняли. Измерение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

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.



край  $\frac{1}{2} R$  центр

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



край  $\frac{1}{2} R$  центр

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

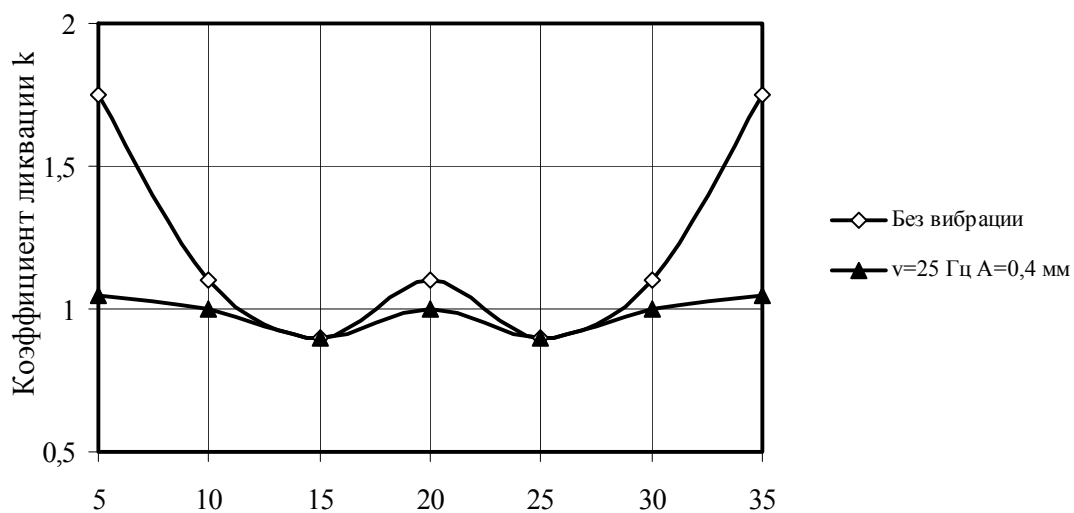


Рис. 5. Распределение кадмия по сечению опытных слитков бронзы БрКд1

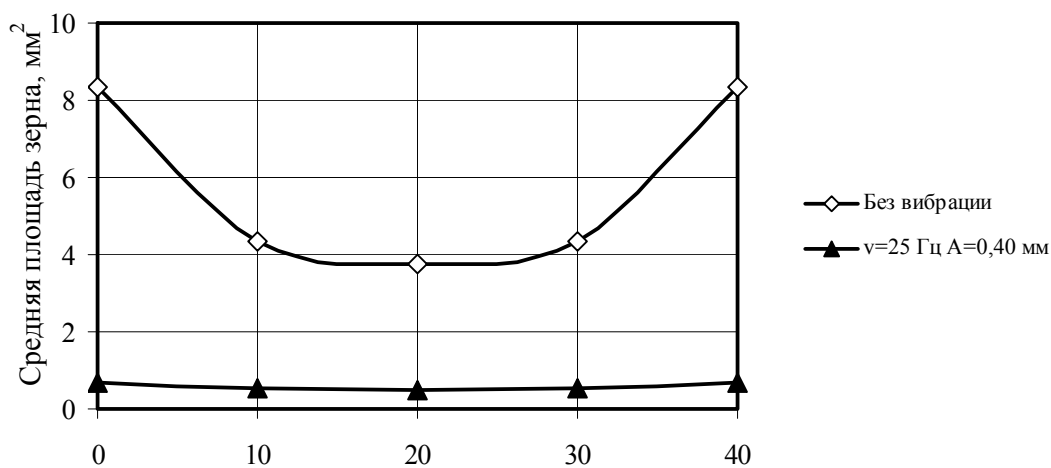


Рис. 6. Изменение средней площади макрозерна по сечению слитков бронзы БрКд1

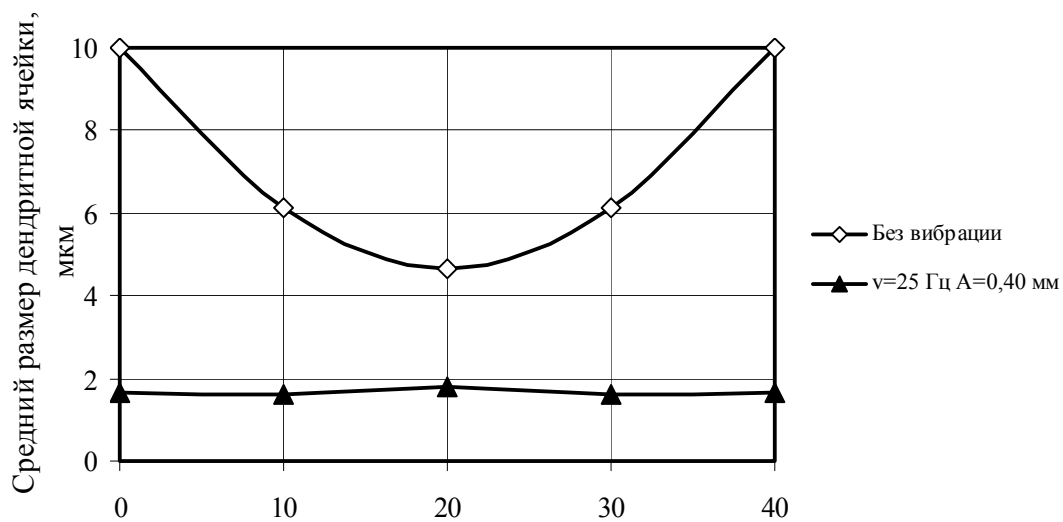


Рис. 7. Изменение среднего размера дендритной ячейки по сечению слитков бронзы БрКд1

Для изучения внутридендритной ликвации кадмия использовали микрорентгеноспектральный анализ с помощью микроанализатора «САМЕ-ВАХ». Микрорентгенограмма характеризует неравномерное распределение кадмия в сплаве БрКд1 с развитым дендритным строением равноосной формой первичных кристаллов (рис. 8).

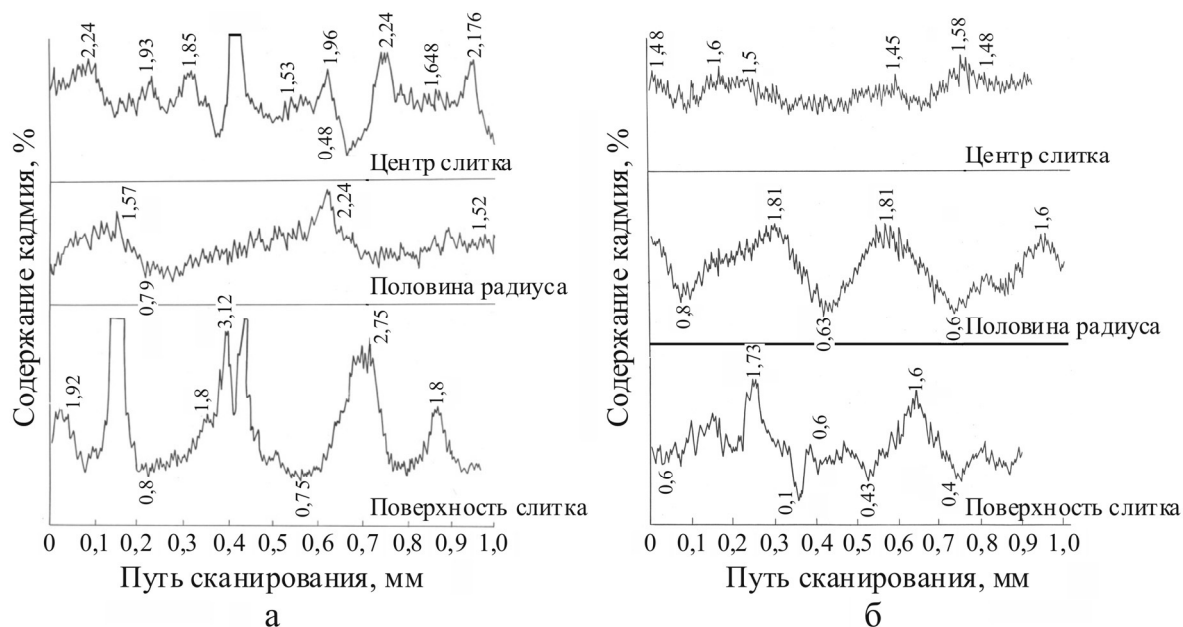


Рис. 8. Распределение кадмия по кристаллическому зерну:  
 а) – без вибрации; б) – с применением вибрационного воздействия  
 с частотой  $\nu = 25$  Гц и амплитудой  $A = 0,4$  мм

Как видно на 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<sup>2</sup>, а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 0,84 до 1,31 мм<sup>2</sup>. Средний размер дендритной ячейки по сечению контрольного слитка изменяется от 4,65 до 10 мкм, а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 1,65 до 1,81 мкм. Коэффициент ликвации кадмия, характеризующий степень неоднородности химического 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.

Поскольку большинство исследователей [7; 8; 9] 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.

На рис. 8 видно, что междудосные 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.

#### **Список использованных источников**

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