

В.386
В.40



**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С МАТЕРИАЛАМИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕДИЦИНЕ**

**Доклады
VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Том II

**Новосибирск, Россия
24 – 27 марта 2015 г.**



**Новосибирск
Параллель
2015**

ДАР БИБЛИОТЕКИ ИТГИМ

B386
B.40
T.II

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН



**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С МАТЕРИАЛАМИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕДИЦИНЕ**

Доклады

VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том II

*Новосибирск, Россия
24–27 марта 2015 г.*

Новосибирск
Параллель
2015

VF

УДК 621.723:669.056.9:535.233.52 +617



Проект организации и проведения VI Всероссийской конференции с приглашением иностранных участников “Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине” (Грант РФФИ № 15-08-20071 Г)



ISBN 978-5-98901-151-3
ISBN 978-5-98901-161-2

© Авторы, 2015
© Составление. ИТПМ СО РАН, 2015

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЫХ СТРУКТУР В МЕДНОМ СЛИТКЕ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

С.П. Бардаханов^{1,3}, А.В. Номоев^{3,4}, А.Р. Раднаев³, Р.А. Салимов²,
К.В.Зобов¹, А.П. Завьялов¹, Э.Ч. Хартаева⁴, С.Б. Батороев³

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

²*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

³*Бурятский государственный университет
670000, Улан-Удэ, Россия*

⁴*Институт физического материаловедения СО РАН
670047, Улан-Удэ, Россия*

В ИЯФ СО РАН совместно с ИТПМ СО РАН более 20 лет ведутся работы по получению наноразмерных порошков различных веществ при испарении их электронным пучком [1–3]. После проведения одной из таких работ было обнаружено новое явление – существование макроскопических формирований в медном слитке (рис. 1). Хотя это обычное явление для некоторых небольших отверстий, сформированных в процессе литья материала, регулярность и глубина структуры каналов удивили и заинтересовали, побуждая дальнейшее изучение их образования.

В 2014 г. проведены работы по исследованию этого экспериментально обнаруженного явления. Отверстия образуются при облучении исходного слитка меди мощным релятивистским пучком электронов, плавлении меди и остывании меди также в виде слитка, но уже с образованием в компактном материале этих полостей.

Твердые образцы промышленной меди марок М0 и М1 помещались в тигли, изготовленные из графита высокой степени чистоты и плотности. Известно, что кислород в меди присутствует в виде закиси меди, которая локализуется по границам зерен. В меди

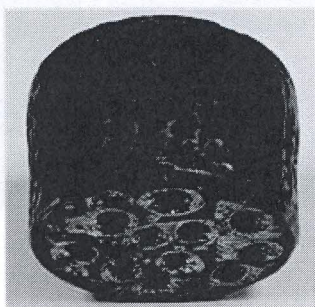


Рис. 1. Медный слиток.
Вид сбоку на нижнюю поверхность

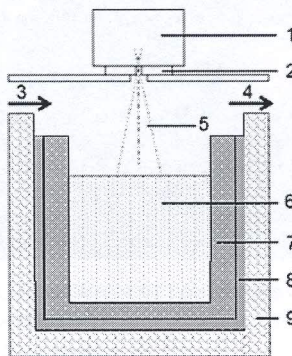


Рис. 2. Схема эксперимента.

1 – камера устройства выпуска электронного пучка в атмосферу, 2 – диафрагма, 3 – электронный пучок, 4 – вход транспортного газа аргона, 5 – выход аргона с наночастицами меди, 6 – расплав меди, 7 – графитовый тигель, 8 – корпус сублиматора с водоохлаждаемыми стенками.

марки М1 минимальное содержание кислорода 0,05 %, М0 – 0,001 %. Тигель с образцом меди помещали в водоохлаждаемый сублиматор, изготовленный из нержавеющей стали. Пространство между стенками сублиматора и графитового тигля заполняли измельченным графитом для равномерного теплообмена (рис. 2).

Высоковольтный ускоритель типа ЭЛВ-6 генерирует электронный пучок с энергией 1,4 МэВ [4]. Пучок выводится в атмосферу через диафрагму и попадает в сублиматор, где плавит и испаряет обрабатываемый материал. Медный образец плавится, а в зоне воздействия медь интенсивно испаряется, пары конденсируются в потоке аргона и далее улавливаются в виде нанопорошка.

Электронный пучок расплавляет медь, она взаимодействует со стенками и дном графитового тигля, нагреваясь до температур, при которых углерод из дна тигля и его стенок начинает растворяться, взаимодействуя с растворенным в меди кислородом.

Поскольку медь в области действия пучка в условиях настоящего эксперимента нагревается до температур, существенно превышающих температуру испарения, то окраинные области расплава могут иметь температуру значительно выше температуры плавления. Поэтому поступление углерода из тигля может быть существенным. В результате, возможно, происходит образование углеродсодержащих газов CO и CO₂ с участием кислорода, содержащегося в меди.

Для проведения экспериментов применялась установка с разомкнутым и замкнутым (рис. 3) газовыми трактами.

Основным различием между конфигурациями газа является скорость охлаждения верхней поверхности меди – у «замкнутого» выше. Несмотря на присутствие системы водяного охлаждения в эксперименте, она в основном используется для охлаждения стального корпуса сублиматора, поэтому корпус не плавится. Графитовый тигель к тому же изолирован от стальной стенки графитовым порошком, основным источником охлаждения расплава меди считается поток аргона.

Во время эксперимента проведено несколько запусков ускорителя. Время воздействия электронным пучком на медь варьировалось от 2 мин. до 30 мин. с силой тока от 3 до 20 мА [5]. Во всех экспериментах, независимо от вида сборки установки и марки меди, после выключения электронного пучка в тигле наблюдали раскаленный оранжево-красный затвердевший слиток. После охлаждения до комнатной температуры верхняя и боковая поверхности образцов имели преимущественно черный цвет из-за окисления горячей поверхности меди.

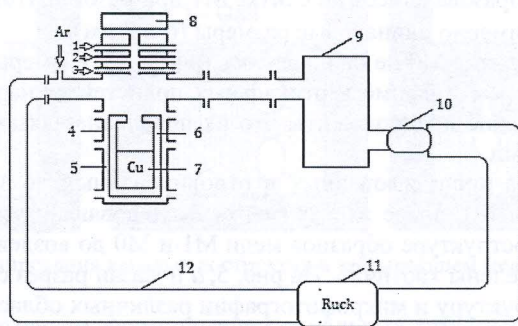


Рис. 3. Схема замкнутого цикла:

1 – воздух; 2 – азот; 3 – вход X; 4 – сублиматор; 5 – графитовый «песок»; 6 – графитовый тигель; 7 – медь; 8 – ускоритель; 9 – отделитель крупных фракций; 10 – фильтр; 11 – вентилятор фирмы Ruck; 12 – газовый тракт.

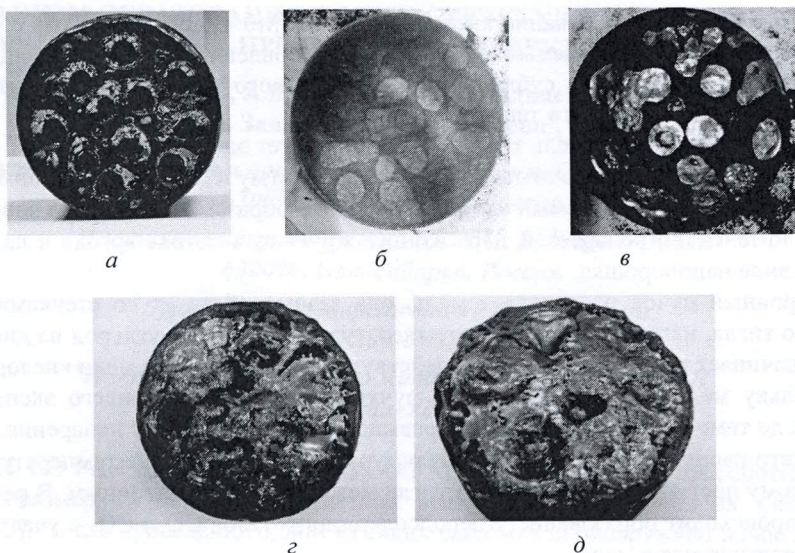


Рис. 4. Медные слитки. Вид снизу.

a – д см. в тексте.

После экспериментов с разомкнутым трактом на нижней поверхности слитков наблюдались лишь овальные пятна, которые, по-видимому, при выполнении других условий были бы основаниями вертикальных каналов. Пятна имеют близкие размеры, например 12×9 мм на одном из слитков (рис. 4, б).

В работе с замкнутым трактом перед выключением электронного пучка увеличивали скорость вращения вентилятора для ускорения темпов затвердевания меди сверху вниз. На нижней части одного из слитков меди М1 образовались многочисленные кратеры, одна вертикальная полость глубиной 1,65 см и две полости глубиной 0,7 см (рис. 4, в). На нижней части другого слитка меди М1 наблюдались кратеры глубиной 0,5 и 0,4 см, на боковых стенках – углубления 1,0 и 1,5 см (рис. 4, д).

Слитки М1 и М0 различаются в основном содержанием в них кислорода, и предполагается, что скорость образования оксида углерода в М0 меди меньше, чем в М1. На нижней части полученного слитка М0 образовались пятна, по расположению и форме похожие на пятна, образовавшиеся на слитке М1 при разомкнутой конфигурации тракта. Они также имели примерно одинаковые размеры (6×7 мм).

Углублений в слитке М0 не наблюдалось (рис. 4, в). Размеры пятен приблизительно соответствуют размерам и форме вертикальных полостей, обнаруженных в первый раз (рис. 1, рис. 4, а.) Можно предположить, что их появление связано с вертикальными канальными структурами.

Микроструктура шлифованных и отполированных до зеркальной поверхности образцов меди М0 и М1 после эксперимента исследована на микроскопе. Включения оксида меди в микроструктуре образцов меди М1 и М0 до воздействия на них электронным пучком распределены хаотично. На рис. 5, а показан разрез слитка М1 через образовавшуюся полую структуру и микрофотографии различных областей на разрезе, из которых следует, что после расплавления М1 электронным лучом медь кристаллизуется с перераспределением оксидов меди по границам зерен меди как эвтектическая фаза (напоминает на структуру паутины) [6].

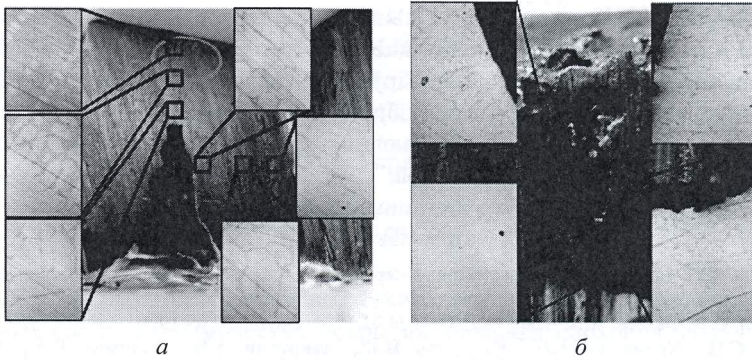


Рис. 5. Фотографии поперечного сечения медных слитков.
а – канал в меди слитка М1, *б* – внутренняя раковина слитка М0.

Между верхним краем слитка и верхней точкой канальной структуры наблюдается интересная картина (обведено синим кругом на рис. 5, *а*). В этом месте в эвтектической системе $\text{CuO} - \text{Cu}$ преобладает оксид меди. Этот участок расположен примерно на 8,5 мм выше канальной структуры, смещен в сторону центральной области слитка (место воздействия электронным пучком) и составляет около 6 мм в ширину и 2,5 мм в высоту. На всех исследуемых образцах эвтектическая область располагалась примерно на 1 см выше кончика структуры канала, что указывает на отношение к газовыделению.

Для меди М0 в замкнутом тракте скорость, при которой образуются пузырьки газа, может быть недостаточной для формирования каналов в процессе кристаллизации. Внутренняя раковина, наблюдаемая на рис. 5, *б*, возможно, была образована при застывании в меди полости с пузырьками газа, в то время как газовый пузырь поднимался на поверхность. Это показывает, что некоторое количество газа сформировалось в системе М0 (как и пятна на дне) и поддерживает предлагаемый механизм формирования структур для канала. Газовый пузырь может увеличиваться, если только давление газа превышает сумму атмосферного давления, гидростатического давления и давления Лапласа [7].

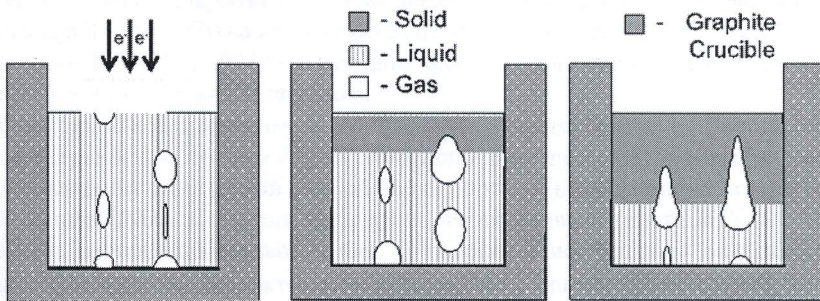


Рис. 6. Схема формирования канальных структур в застывающем медном расплаве.

Таким образом, механизм формирования канальных структур предположительно основывается на затвердевании расплава меди с захватом выделяющихся пузырей газа (рис. 6). Для систем, в которых скорость охлаждения достаточно высокая, затвердевание верхней поверхности медного расплава будет препятствовать выходу пузырьков газа из

меди. Поскольку фронт кристаллизации движется вниз, твердое вещество застывает с пузырями газа в виде пустот, и последующие газы, которые поднимаются к свободному месту, расширяют пузырь у основания. Структура канала растет сверху вниз вместе с фронтом кристаллизации меди. Когда для образовавшегося газа не хватает пространства, он выходит между стенкой тигля и застывающим слитком, вызывая образование полосатой структуры на боковых сторонах слитков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ 2067077. Способ получения ультрадисперсной двуокиси кремния, устройство для его осуществления и ультрадисперсная двуокись кремния / В.П. Лукашов, С.П. Бардаханов, Р.А. Салимов, А.И. Корчагин, С.Н. Фадеев, А.В. Лаврухин. Заяв. 26.01.1994. Опубл. 27.09.1996.
2. Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куksанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.В. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409, № 3. С. 320–323.
3. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K. et al. Nanopowder production based on technology of solid raw substances evaporation by electron beam accelerator // Materials Science and Engineering B. 2006. Vol. 132, N 1-2. P. 204–208.
4. Kuksanov N.K., Korabelnikov B.M., Kosilov M.R., Nemytov P.I, Prudnikov V.R., Salimov R.A., Veis M.E. Development of the next generation of powerful electron accelerators // Rad. Phys. and Chem. 1995. Vol. 46, Iss. 4–6, Pt 1. P. 481–484.
5. Хартаева Э.Ч., Бардаханов С.П., Номоев А.В., Зобов К.Б., Завьялов А.П., Гармаев С.С. Воздействие электронного пучка на медный слиток // Наноматериалы и технологии-V: Сб. трудов 5 Всерос. конф. с междунар. участием. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2014. С. 285–290.
6. ГОСТ 13938.13-93. Медь. Методы определения кислорода.
7. Коновалов А.Н. Исследование особенностей плавки и раскисления меди с целью получения литых электродов из хромовых бронз. М.: МИСиС, 2011.

Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами
в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской
конференции. Т. 2. Новосибирск: Параллель, 2015. 152 с.

Ответственный за выпуск В.В. Бублик
Редактор Н.А. Лившиц
Технический редактор Т.В. Ветровская

Подписано в печать 16.05.2015
Формат бумаги 70 × 100/16, Усл. печ. л. 12.6
Уч.-изд. л. 12.3, Тираж 150 экз., Заказ № 2904-4

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1