

В диссертационный совет Д 212.285.05  
при ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

## **ОТЗЫВ**

**Официального оппонента на диссертационную работу Сулицина  
Андрея Владимировича «Развитие теоретических и технологических  
основ производства литых заготовок из электротехнической меди»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.16.04 – «Литейное производство»**

### **1. Актуальность избранной темы**

Выпуск электротехнической продукции из меди с четко заданными параметрами качества заставляет производителей постоянно совершенствовать технологию изготовления катанки, которую получают способом непрерывного литья и прокатки, в частности на установке «Contirod». Известно, что качество катанки в значительной степени определяется качеством литой заготовки из кислородсодержащей меди. Важными показателями качества катанки являются: параметры жидкого состояния меди, содержание в расплаве кислорода, водорода и примесей, условия затвердевания заготовки из меди при литье в ленточный кристаллизатор и др. При этом особое значение следует придавать взаимосвязи структуры и свойств литой заготовки со свойствами катанки после пластической обработки. Поэтому разработка комплекса технических решений, направленных на формирование заданной структуры и свойств литых заготовок из меди в условиях высоких скоростей охлаждения и внешних воздействий на кристаллизующийся расплав является актуальной проблемой литейного производства.

Актуальность работы подтверждена государственными программами в рамках научно-исследовательских работ № 1.2217.07; № 7.1833.2011; № 11.569.2014/К, а также Гранта Президента РФ для молодых российских ученых-кандидатов наук МК-1234. 2010.8 «Исследование особенностей формирования структуры и свойств меди и медных сплавов в условиях внешних воздействий на кристаллизирующийся расплав».

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов, сформулированных в диссертации.**

На основании современных научных представлений о факторах, влияющих на достижение высокого качества изделий электротехнического назначения, полученных способом непрерывного литья и прокатки, сделан вывод о необходимости исследования особенностей формирования структуры и свойств литых заготовок из кислородсодержащей меди в условиях интенсивного охлаждения. При разработке комплекса технологических решений принималось во внимание, что свойства катанки определяются заданными режимами плавки и литья, свойствами расплава, кристаллизационными параметрами, а также режимами дальнейшей пластической обработки литой заготовки. Для реализации поставленной цели сформулированы задачи исследования. Полученные результаты позволили обосновать совокупность научных положений, обеспечивающих решение актуальной проблемы литейного производства – создание эффективных технологий в области непрерывного и полунепрерывного литья заготовок и полуфабрикатов из кислородсодержащей меди, позволяющих получать в процессе их последующей пластической обработки высококачественные изделия электротехнического назначения.

Сделан ряд соответствующих выводов и рекомендаций по результатам исследования влияния температуры, скорости охлаждения расплава меди, содержанию примесей на строение жидкой фазы, кристаллизационные параметры литья, а также влияние модификаторов и вибрации на

структурообразование и свойства литой заготовки. В частности, установлено, что вибрационная обработка расплава меди в процессе кристаллизации с оптимальной частотой 18 Гц и амплитудой 1,5 мм позволяет полностью устранить столбчатые кристаллы в структуре слитков диаметром 65 мм и получить равномерную мелкозернистую структуру со средней площадью сечения зерна до  $0,43 \text{ мм}^2$  и средним размером дендритной ячейки 1,8 мкм. При этом обеспечивается равномерность механических свойств меди по всему сечению слитка.

Для выявления вероятности образования дефектов в литой заготовке проведено компьютерное моделирование процесса ее затвердевания в условиях совмещенного способа литья и прокатки, экспериментально установлена закономерности нарастания твердой корочки меди во времени, определены глубина лунки жидкого металла в кристаллизаторе и перепад температур в различных сечениях заготовки, а также проведен анализ образования в литой заготовке неслитин и газовых пор, являющихся основной причиной образования трещин в медной катанке после испытания на скручивание с последующим раскручиванием. Диссертантом предложена методика оценки содержания водорода в пробах, отобранных на различных участках литейного тракта линии Contirod, и на основании анализа содержания водорода в жидкой меди скорректированы технологические режимы подготовки расплава и литья, позволяющие уменьшить содержание водорода в жидкой меди до 0,84 ppm, что исключает формирование газовых пор размером более 50 мкм в литой заготовке. Предложен новый технологический регламент непрерывного литья меди в ленточный кристаллизатор, который позволил значительно уменьшить количество газовых пор в катанке, при этом их размер в поперечном сечении образцов не превышает 30 мкм, а после испытания такой катанки глубина вскрывшегося дефекта составила 0,06 мм и длина – 43 мм.

Научные положения, выводы и рекомендации соответствуют названию, целям и задачам диссертации. Их реализация подтверждается успешными промышленными испытаниями и внедрением результатов работы на ОАО «Ревдинский завод по обработке цветных металлов», ЗАО «СП «Катур-Инвест» и на ряде других предприятий по обработке цветных металлов.

### **3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность экспериментальных данных подтверждена использованием автором современного научного оборудования и методов исследования металлургических процессов. Для обработки результатов экспериментов в работе использовались методы математической статистики.

Следует отметить комплексный подход диссертанта к решению проблемы формирования качества литых заготовок и катанки в условиях совмещенного способа литья и прокатки, основанный на взаимосвязи строения и свойств меди в жидком и твердом состоянии, особенностях физико-химических и тепловых процессах на всех участках технологического цикла.

Исследуя особенности получения непрерывнолитых заготовок из электротехнической меди, диссертантом установлена анизотропия свойств меди, обусловленная столбчатой структурой заготовок и большой протяженностью стыковых границ между структурными зонами с различной направленностью роста кристаллов. Учитывая, что термоскоростная обработка расплава влияет на процессы кристаллизации и структурообразования, автором методом гамма-проникающих излучений определены параметры жидкого состояния расплава, и установлен температурный диапазон 1250-16320 °С, в котором происходит процесс перехода упорядоченной структуры жидкой меди к разупорядоченной, позволяющей определить температурные параметры плавки меди. С целью

устранения столбчатой структуры, анизотропии свойств и пластического течения в работе исследуются механизмы модифицирования и вибрации, значения которых необходимы для управляемого воздействия на расплав меди в предкристаллизационный период и получения мелкозернистой равноосной структуры. В частности, диссертантом установлено, что для меди марки М00 превалирует механизм модифицирования, связанный со стабилизацией и ростом упорядоченных группировок, способных стать центрами кристаллизации, а для меди марки М1 доминирует зародышевый механизм в связи с присутствием большего количества примесей в объеме расплава. Однако, исходя из гипотетической модели состояния частицы комплексного модификатора в расплаве, не совсем ясно, какие группировки и примеси могут стать центрами кристаллизации, а какие нет.

Представляют научный и практический интерес результаты компьютерного моделирования процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки по мере ее продвижения в кристаллизаторе, позволившие определить температурные поля в поперечном сечении заготовки при различных скоростях литья и условиях охлаждения, обусловленных изменением конструкции кристаллизатора. На основании полученных данных удалось за счет интенсификации теплообмена с применением модернизированного кристаллизатора увеличить скорость литья до 11 м/мин и, соответственно, производительность установки без опасности прорывов жидкого металла и образования горячих трещин.

На основании опытно-промышленных испытаний и анализа технологических параметров непрерывного литья меди выявлены закономерности образования дефектов в литой заготовке и катанке. Установлено, что газовая пористость, образуемая растворенным в расплаве водородом, является основной причиной возникновения трещин в катанке при испытаниях. Испытания катанки на скручивание с последующим раскручиванием показали, что наибольшую опасность представляют газовые

поры размером более 50 мкм. Корректировка технологических параметров литья позволила рекомендовать технологический регламент литья заготовок из меди диаметром 8 мм, исключая подачу воздуха в расплав в соединительном желобе, при этом для контроля расплава в литейном желобе предложено применять азот газообразный особой чистоты. Предлагаемые технологические решения прошли успешные промышленные испытания и внедрены на предприятиях по обработке цветных металлов.

#### **4. Замечания.**

1. Кислородная медь при  $1066^{\circ}\text{C}$  образует эвтектику с содержанием 3,47%  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Микрогетерогенное состояние данной системы обусловлено наличием дисперсных частиц закиси меди, которые с повышением температуры плавятся с образованием области несмешиваемости. Учитывались ли данные явления при описании состояния и структуры жидкой меди при нагреве и охлаждении?

2. Автор утверждает, что введение в расплав меди любой ограниченно растворимой или нерастворимой в твердой фазе примеси может вызвать эффект модифицирования (стр. 113). Какова устойчивость гетерофазных дисперсных систем, полученных путем экзогенного введения наноразмерных твердых фаз и какими должны быть межфазные характеристики: межфазное натяжение и краевые углы смачивания?

3. Редкоземельные металлы в составе миш-металла безусловно оказывают положительное влияние на структуру меди, очищая границы зерен от вредных примесей. Продукты реакции (оксиды и сульфиды РЗМ) могут выполнять роль модификатора, если они изоморфны с кристаллом расплава. Однако, в работе эти данные не приводятся, а также не указываются свойства межфазной границы при гетерофазной кристаллизации.

4. Известно применение лигатуры Cu-B для раскисления электротехнической меди, может ли в этом случае продукт раскисления выполнять роль модификатора?

5. Известно, что в расплавах не существует межфазных поверхностей раздела между кластером и разупорядоченной зоной, тогда что понимается под «межкластерной границей» (стр.121) ?

6. Желательно было бы исследовать влияние РЗМ не только на структуру и механические свойства меди, но и оценить влияние микролегирования на электросопротивление и температуру рекристаллизации меди.

7. На мой взгляд, в диссертационной работе есть некорректные выражения. Например, «высотная деформация», «адсорбированный слой кластеров», «коагуляция пор» и др.

#### **5. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней»**

Высказанные замечания не снижают теоретическую и практическую значимость и ценность диссертационной работы Сулицина А.В., которая выполнена на актуальную тему и содержит научно обоснованные технологические решения в области непрерывного и полунепрерывного литья заготовок из меди, позволяющие повысить качество литых заготовок и полуфабрикатов из меди.

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, решающей важную и актуальную научно-техническую проблему в области литья заготовок из меди и содержащей технологические решения, внедрение которых в производство вносит существенный вклад в развитие страны.

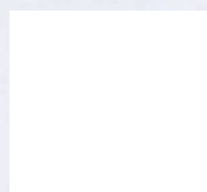
Эффективность предлагаемых решений подтверждается промышленными испытаниями и внедрением на ОАО «Ревдинский завод по обработке

цветных металлов», ЗАО «СП «Катур-Инвест» и ООО «Производственное объединение «Пермский завод цветных металлов». Результаты работы могут использоваться предприятиями, производящими деформированные полуфабрикаты из меди.

Диссертация и автореферат находятся в полном соответствии и по содержанию соответствуют паспорту специальности 05.16.04 – Литейное производство. Опубликованные по теме диссертации работы и автореферат достаточно полно отражают содержание работы.

В целом представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Сулицин Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры  
материаловедения и технологий  
обработки материалов



Бабкин  
Владимир  
Григорьевич

660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 26А

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Тел. (391) 291-27-76. E-mail: lpiomd@bk.ru



ФГАОУ ВО СФУ  
Подпись Бабкин  
Начальник общего отдела  
\* 20 \* // 20 / 7 г.