

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы. Производство и потребление меди, прежде всего электротехнического назначения, имеет устойчивую тенденцию к росту. В то же время номенклатура производимой продукции увеличивается, а требования к её качеству возрастают. Технологический процесс производства продукции из электротехнической меди включает стадии приготовления расплава, непрерывного или полунепрерывного литья заготовок и последующего их пластического деформирования. При этом наиболее сложным и зависящим от многих влияющих факторов является процесс формирования заготовок в формообразующих устройствах. Активное воздействие на поступающий в кристаллизатор медный расплав газовой среды, формирование заготовки в условиях интенсивного охлаждения обуславливают образование в ней нежелательной структуры, пор и раковин. Они при последующей пластической обработке выявляются в виде различных поверхностных и внутренних дефектов. При этом снижается технологичность процесса и ухудшается качество продукции. Поэтому тема диссертационной работы Сулицина А.В., посвященной совершенствованию технологии производства литых заготовок и изделий из электротехнической меди на основе комплексного исследования особенностей формирования в них структуры и свойств в условиях высоких скоростей охлаждения и внешних воздействий на кристаллизующийся расплав, весьма актуальна.

Диссертационная работа Сулицина А.В. представлена на 372 стр. и состоит из введения и 6 глав, заключения, списка литературы из 239 источников и 7 приложений. Основной текст диссертации изложен на 306 стр.

Во введении дана общая характеристика исследуемой проблемы, обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна полученных результатов, теоретическая и практическая значимость работы и приведены научные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен обзор литературных источников, в которых рассмотрены вопросы получения качественных медных литых заготовок. Выполнен анализ различных технологических схем производства медной катанки, прежде всего основанных на совмещенных способах литья и прокатки. При этом особое внимание уделено наиболее производительному его варианту Contirod. Показано, что имея наибольшую производительность, он, однако, не обеспечивает стабильное качество медной катанки. Главными причинами этого являются формирование в литых заготовках крупнокристаллической

столбчатой структуры, а также их высокая дефектность по неслитинам, газовым порам и трещинам. Исходя из этого, разработка технических и технологически решений, обеспечивающих устранение этих нежелательных факторов, обоснованно сформулирована как основная цель диссертационной работы. Для её достижения в работе поставлены конкретные задачи, в том числе модифицирования медного расплава и вибрационного воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл.

В главе 2 приведены результаты исследований структуры и свойств литой меди. Показано, что из-за высокой теплопроводности медь имеет повышенную склонность к формированию крупнокристаллической структуры из столбчатых кристаллов, вытянутых в направлении теплоотвода. При этом свойства меди вдоль и поперек направления роста кристаллов сильно различаются. Наибольшая анизотропия свойств характерна для литых заготовок, полученных способом Contirod, поскольку они имеют прямоугольную форму.

По результатам большого объема натуральных испытаний получен важный результат, который необходимо учитывать при назначении режимов пластического деформирования литых заготовок: медь проявляет анизотропные свойства при воздействии на образец перпендикулярно направлению роста столбчатых кристаллов и не проявляет анизотропные свойства при воздействии на образец вдоль направления роста столбчатых кристаллов.

Другой важный результат этих испытаний: характер структуры литых заготовок мало зависит от скорости кристаллизации. Независимо от способа литья и размера литых заготовок в них формируется столбчатая структура, которая обладает анизотропией свойств и пластического течения. Из этого сделан очевидный вывод о необходимости получения в литых заготовках мелкозернистой равноосной структуры, для чего медь в предкристаллизационный период следует подвергнуть модифицирующему и вибрационному воздействию.

В главе 3 изложены результаты исследования влияния модифицирования и вибрационной обработки на структуру и свойства меди. Выбор элемента-модификатора предложено осуществлять по коэффициенту модифицирующей активности μ , который представляет собой отношение разности эффективных ионизационных потенциалов матрицы и модификатора к растворимости модификатора в твердой меди. С использованием этого коэффициента выполнено ранжирование элементов, где демодификаторы имеют отрицательное значение коэффициента, а модификаторы – положительное значение. Согласно экспериментальным данным наилучшими модификаторами для меди оказались РЗМ, которые имеют наибольшие значения μ - в пределах 210-410 эВ/ат. %. Добавки РЗМ в виде миш-металла в небольших количествах (0,003-0,008 %) позволяют устранить транскристаллизацию и формирование столбчатых кристаллов. При этом также существенно уменьшается размер

дендритной ячейки. Такая трансформация структуры обеспечивает повышение предела прочности, относительного удлинения и твердости на 10-15 %.

Предложены разные механизмы модифицирующего воздействия РЗМ на медь марок М00 и М1. В первом случае модифицирующий эффект является результатом роста упорядоченных группировок (кластеров), которые усиливают микронеоднородность расплава и способны стать центрами кристаллизации. Во втором случае он обусловлен взаимодействием РЗМ с кислородом и серой, растворенными в жидкой меди, и образованием тугоплавких оксидов и сульфидов, становящихся центрами кристаллизации. Представлена термодинамическая оценка вероятности протекания реакций их образования по значению ΔG^0 .

Показано, что наложение вибрации на кристаллизующийся расплав также эффективно устраняет транскристаллизацию и измельчает структуру. Методом планирования экспериментов установлены оптимальные параметры вибрационной обработки кристаллизующейся меди (частота вибрации 18-19 Гц и амплитуда 1,4-1,6 мм), которые рекомендованы к промышленному применению. Трансформация структуры медных заготовок при вибрационном воздействии представлена как результат разрушения существующих кристаллов на мелкие обломки, из которых не успевшие расплавиться становятся центрами кристаллизации.

В главе 4 представлены результаты исследования процесса затвердевания литой заготовки прямоугольного сечения в движущемся ленточном водоохлаждаемом кристаллизаторе литейной машины Hazelett, входящей в состав комплекса Contirod.

Для решения такой сложной задачи диссертант обоснованно воспользовался возможностями компьютерной программы ProCast. Это позволило определить температурные поля в поперечном сечении слитка по длине кристаллизатора и построить профили лунок жидкого металла. Эти исследования дополнены физическими экспериментами по прямому измерению температуры в зоне первичного охлаждения. На основе полученных результатов установлены закономерности нарастания твердой корки меди от верхней, нижней и боковых граней к центру заготовки при литье в ленточный водоохлаждаемый кристаллизатор.

Комплексные исследования позволили получить адекватную термовременную картину затвердевания меди в отливаемой заготовке, установить координаты и профиль лунки жидкого металла в затвердевающей заготовке и определить критические скорости литья, при которых лунка выходит за пределы кристаллизатора и создается опасность прорыва жидкого металла.

В главе 5 рассмотрены особенности поведения литейных дефектов в заготовках меди марки М00 в условиях совмещенного способа литья и прокатки. Показано, что литые заготовки имеют дефекты в виде газовых пор, неслитин и трещин. Выполнен детальный анализ размерной и количественной

характеристики этих дефектов, выявлены места их преимущественного расположения в литой заготовке и дана оценка факторов их образования.

Подробно изучена трансформация дефектов в процессе пластической деформации на многоклетьевом стане. Установлено, что ряд дефектов в литой заготовке не залечивается при прокате и провоцирует образование дефектов в катанке. Это, прежде всего, газовые поры размером более 50 мкм. Из этого сделан вывод о том, что для предупреждения их образования в литой заготовке необходимо изменить технологический регламент по температурным и скоростным параметрам литья, режиму охлаждения кристаллизатора, применению рабочих газовых сред.

В главе 6 приведены результаты исследования влияния технологических параметров непрерывного литья на возникновение дефектов в литых заготовках и катанке. Они имеют особую ценность, поскольку получены на промышленной установке. Для решения поставленной задачи снижения дефектности литых заготовок до уровня обеспечения бездефектной и качественной катанки выполнены сравнительные эксперименты по четырем технологическим режимам.

Результатом этих исследований стал новый технологический регламент непрерывного литья меди, включающий уточненные параметры по температуре и скорости литья, температуре охлаждающей воды и температуре блоков кристаллизатора, исключение вдувания воздуха в расплав меди, а также применение для контроля уровня расплава в литейном желобе азота особой чистоты вместо азота технической чистоты.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, достаточно убедительна. Они базируются на известных научных представлениях из разных областей знаний – физике жидкого и твердого тела, термодинамике и др. При этом некоторые теоретические представления получили в работе дальнейшее развитие применительно к решаемой проблеме производства литых заготовок из электротехнической меди.

Достоверность результатов исследований подтверждена большим объемом экспериментальных результатов, полученных автором с применением широкого спектра оригинальных и современных методов исследований, воспроизводимостью экспериментальных данных, высокой сходимостью результатов лабораторных и промышленных испытаний. Она также подтверждается широкой апробацией на международных, всероссийских и региональных научно-технических форумах.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается том, что в ней получили дальнейшее развитие теоретические основы производства литых заготовок из электротехнической меди. В частности, они включают:

- установление характера анизотропии свойств непрерывнолитых заготовок из электротехнической меди и степени анизотропии их формоизменения в поперечном, продольном и горизонтальном направлениях, которые позволяют прогнозировать пластическое течение металла при прокатке литых заготовок;

- выявление аномального характера изменения удельного электросопротивления меди в интервале температур 1250-1320 °С, который обусловлен, согласно данным определения степени уплотнения и коэффициента термического сжатия жидкой меди, образованием в ней статистически разупорядоченной структуры;

- предложение параметра для оценки модифицирующей активности химических элементов в меди в виде коэффициента, равного отношению разности эффективных ионизационных потенциалов матрицы и модификатора к растворимости модификатора в твердой меди, и выполнение ранжирования элементов по наибольшему значению этого коэффициента как наилучших модификаторов для меди;

- установление корреляционной связи параметров структуры и свойств литой меди с частотой и амплитудой вибрационной обработки расплава меди;

- установление на основе компьютерного моделирования координат и профиля лунки жидкого металла в затвердевающей заготовке, критических скоростей её литья, при которых лунка выходит за пределы кристаллизатора, создавая опасность прорыва жидкого металла;

- установление методом термографирования количественных зависимостей нарастания твердой корки меди от верхней, нижней и боковых граней к центру заготовки при литье в ленточный водоохлаждаемый кристаллизатор, что позволило получить адекватную термо-временную картину затвердевания меди в отливаемой заготовке.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается том, что в ней на основе новых научных знаний разработаны технические решения, позволившие решить проблему получения литых заготовок из электротехнической меди с мелкозернистой структурой и однородностью свойств, при которых обеспечивается получение деформированных изделий высокого качества. В частности, они включают:

- мотивированный выбор модификатора для меди и определение дозы модифицирующей присадки в виде РЗМ;

- разработку технологии обработки жидкой и затвердевающей меди низкочастотной вибрацией и определение оптимальных режимов её реализации;

- разработку и внедрение скорректированного технологического регламента непрерывного литья меди в ленточный кристаллизатор, который включает ограничения по температурному и скоростному режиму литья, температуре охлаждающей воды и блоков кристаллизаторов;

- комплекс технологических мероприятий, реализация которых позволила повысить эффективность производства деформированных заготовок из

электротехнической меди за счет снижения дефектности литых заготовок, улучшения их качества и увеличения выхода годной продукции.

Замечания по работе

1. В гл. 3 предложен новый параметр для оценки модифицирующей активности химических элементов в меди: чем он больше, тем выше модифицирующая активность. В связи с этим непонятно, по какому принципу ранжирования построена табл. 3.1?
2. Оценка термодинамической вероятности протекания реакций образования в жидкой меди оксидов и сульфидов РЗМ по значению ΔG^0 реакций взаимодействия РЗМ с оксидом и сульфидом меди не совсем корректно. Следовало бы рассмотреть реакции взаимодействия растворенных в жидкой меди РЗМ с растворенными в ней кислородом и серой и оценивать вероятность протекания этих реакций по значению ΔG для реальных концентраций участвующих в реакции компонентов.
3. В работе показана высокая эффективность воздействия вибрационной обработки на структуру меди, но применительно к литью слитков в изложницах. Каковы предпосылки использования вибрационной обработки в условиях непрерывного литья медных заготовок?
4. К сожалению, в работе не уделено достаточного внимания металлургическим аспектам приготовления медного расплава, пригодного для изготовления продукции электротехнического назначения. В частности, не затронуты проблемы качества исходных материалов (катодной меди), возможности использования собственных и покупных отходов, экспресс-контроля содержания кислорода для гарантированного обеспечения его в требуемых пределах, а также рафинирования медного расплава от растворенного водорода.
5. Кажется нелогичным, что многие разработки диссертанта, имеющие техническую новизну, не защищены патентами и авторскими свидетельствами.
6. На многих рисунках, в т. ч. 3.4, 3.5, 3.7 и др., отсутствуют экспериментальные точки.
7. На многих рисунках, в т. ч. в главе 2 (рис. 2.9, 2.10 и др.), главе 3 (рис. 3.3, 3.6 и др.) не указаны масштабы изображения, что затрудняет их правильное восприятие и оценку.

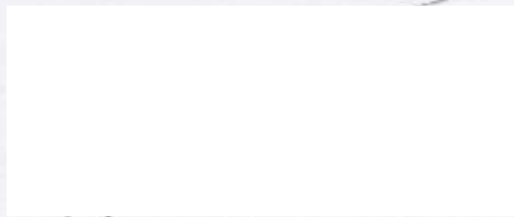
Заключение. Диссертационная работа Сулицина А.В. на тему «Развитие теоретических и технологических основ производства литых заготовок из электротехнической меди» является завершенной научно-квалификационной работой, посвященной решению важной и актуальной проблемы повышения эффективности производства и качества продукции из электротехнической меди. Диссертация и автореферат Сулицина А.В. 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 выполнена на высоком научном уровне, имеет большое практическое значение и 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 литейных технологий
и художественной обработки материалов



Тен Эдис Борисович

15.11.2017 г.

Исходное
Проекту
по общим вопросам
ИИТУ «МИСиС»

ЗАБЕЖИ
ИИ. ИСАЕВ

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
Тел. (499) 7645261. E-mail: edis_ten@mail.ru