

УДК 536.24: 669.3

**ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОГО  
ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
УСТАНОВКАХ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

**А.П. Скуратов**

*Сибирский федеральный университет, Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

[a.skuratov@mail.ru](mailto:a.skuratov@mail.ru)

В докладе представлен обзор методов и некоторых результатов исследования процессов сложного теплообмена в высокотемпературных технологических установках цветной металлургии, проводимых на протяжении ряда лет в Сибирском федеральном университете. В содружестве с научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями решались задачи создания эффективной и надежной аппаратуры для новых энерго- и ресурсосберегающих экологически безопасных технологий, совершенствования действующих пирометаллургических установок, внедрения методов их интенсификации и оптимального управления. В зависимости от решаемых задач использовались методы расчета и, соответственно, теплофизические модели различного уровня сложности: инженерные, зонально-узловые и потоковые. В частности, в последнее время достаточно активно при математическом моделировании применялись такие универсальные программные продукты как Ansys, Procast, LWM и др.

Математические модели использовались при исследовании энергоемких технологических процессов и установок для производства алюминия и его сплавов (вращающиеся прокаточные печи для производства анодной массы, электролизные ванны, установки для получения гранул свинецсодержащих алюминиевых лигатур), меди (автогенные энерготехнологические установки для плавки медьсодержащего сульфидного сырья), литья и кристаллизации ряда благородных металлов и сплавов (золотых ювелирных сплавов, слитков палладия и платины).

## *Введение*

Рассмотрены вопросы применения аппарата математического моделирования сложного теплообмена при совершенствовании энергоемких теплотехнологических процессов и установок цветной металлургии. Решались задачи создания эффективной и надежной аппаратуры для новых энерго- и ресурсосберегающих экологически безопасных технологий, совершенствования действующих пирометаллургических установок, внедрения методов их интенсификации и оптимального управления. Математические модели различного уровня сложности использовались при исследовании технологических процессов и установок для производства алюминия и его сплавов, меди, литья ряда благородных металлов и сплавов.

### *1. Производство алюминия и его сплавов*

#### *1.1. Повышение производительности вращающихся печей для термообработки нефтяного кокса*

Модернизация алюминиевых заводов предполагает увеличение выпуска металла, что неизбежно приводит к дефициту исходного сырья для производства анодной массы. Одним из условий обеспечения возросших потребностей в прокаленном коксе является повышение производительности прокалочных печей. Увеличение производительности прокалочных печей может быть достигнуто за счет форсирования их тепловой мощности. Другой путь, связанный с изменением технологической схемы процесса прокалки, – осуществление предварительной сушки сырого нефтяного кокса.

Расчетная оценка эффективности тепловой работы вращающейся прокалочной печи проведена с использованием математической модели, построенной в соответствии с известной инженерной методикой, которая учитывает теплопотребление и особенности теплообмена в каждой ее зоне [1]. Расчетный анализ показал, что имеется возможность повышения производительности печи по сырому коксу до 20 % и более при соответствующем повышении тепловой нагрузки от сжигания мазута. Однако, при форсировании тепловой мощности печи возрастают и потери исходного сырого материала с угаром. Установлено, что при увеличении производительности печи и стабилизации величины угара углерода имеется необходимость в

оптимизации параметров факела (длины, светимости и температуры), обеспечивающих быстрое нагревание шихты.

Предложено для увеличения производительности прокалочных печей применить способ стабилизации характеристик исходного сырья по влажности с уменьшением первоначального ее содержания до 0,5-1,0 %. Отметим, что расход теплоты на испарение влаги кокса и перегрев водяных паров до температуры отходящих газов достигает в зоне сушки прокалочных печей 10-12 %. В связи с этим поставляемый нефтяной кокс может быть подвергнут предварительной сушке в одной из вращающихся печей той же конструкции (рис. 1).

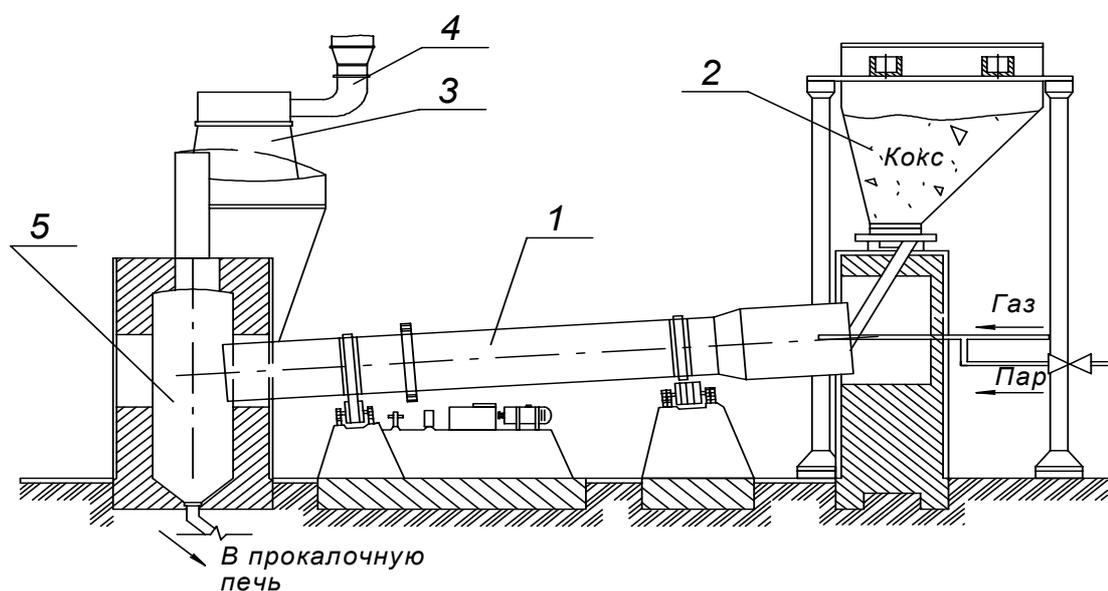


Рис. 1. Вращающаяся печь для сушки сырого нефтяного кокса:  
1 – печь; 2 – бункер; 3 – циклон; 4 – дымовая труба; 5 – перегрузочное устройство

Далее стабилизированный по влажности просушенный нефтяной кокс подвергается прокалке в других вращающихся печах. Согласно предлагаемой технологической схеме прокалки, сырой кокс из бункера через питатель по ленточному дозатору попадает в сушильный барабан. Для сушки используется часть отходящих от прокалочных печей газов, расход которых регулируется при помощи шиберов. Регулирование температуры поступающих в сушилку газов может осуществляться, например, подачей пара от пароперегревателя. Режим движения газа и кокса прямоточный. Просушенный кокс по перегрузочной точке поступает в прокалочную печь. Так как поступающий на прокалку кокс не содержит влаги, то зона сушки

исключается. Зона прокалики увеличивается, что, очевидно, позволяет загружать больше кокса, тем самым повысить производительность печи.

Установлено, что предварительная сушка и подогрев сырья перед прокаливанием позволяют повысить эффективность работы вращающейся печи: стабилизировать тепловую работу и увеличить производительность, снизить максимальную температуру в рабочем пространстве, дать существенную экономию дефицитного мазутного топлива. Так, например, согласно расчетам, предварительная сушка позволяет увеличить производительность печи по прокаленному коксу на 13 % [2].

### *1.2. Повышение эффективности работы электролизера с самообжигающимися анодами*

В электролизерах с самообжигающимися анодами одним из важнейших вопросов является оценка теплового состояния и распределения электрического тока в объеме. Экспериментальные исследования тепловых и электрических полей в электролизерах трудоемкая задача, которая не может дать полной информации о процессах теплообмена. Была разработана трехмерная математическая модель электролизера, в которой наряду с решением уравнения энергии решалось уравнение электрического потенциала (рис. 2).

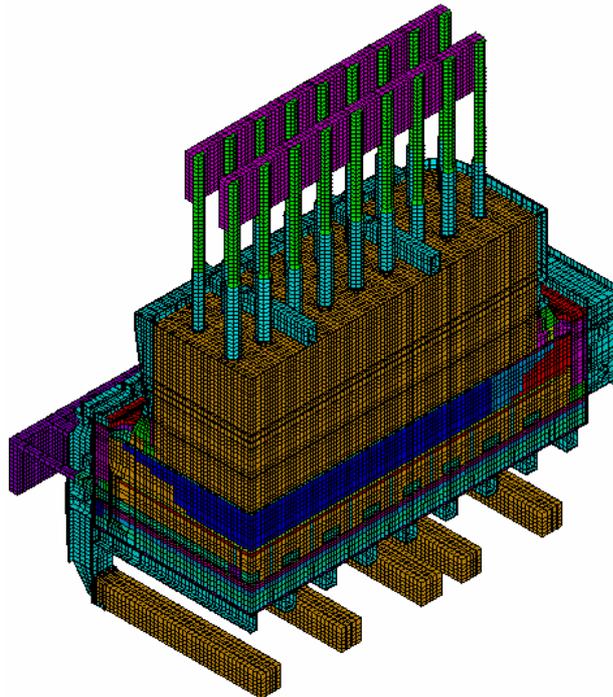


Рис. 2. Конечно-элементная сетка четвертой части электролизера

Для материалов с анизотропными теплофизическими параметрами учитывалось изменение их значения от направления, все теплофизические параметры зависели от температуры. Влияние гидродинамики на теплообмен в расплаве учитывалось путем введения эффективных коэффициентов теплопроводности, значения которых принимались согласно данным промышленных экспериментов. При построении конечно-элементной сетки в модели учитывались форма анодных штырей, теплофизические параметры анодной массы, термические и электрические контактные сопротивления в токоподводящих и токоотводящих частях, которые определяют неидеальный контакт поверхностей элементов электролизера. Решение задачи проводилось с использованием численного метода конечных элементов при помощи программного комплекса Ansys. Апробация разработанной математической модели проводилась путем сравнения полученных результатов расчета с данными промышленных опытов. Сравнение показывает на качественно правильный характер изменения температурных кривых, полученных расчетом. Значения расчетных температур и тепловых потоков на кожухе (на уровне поверхности раздела «металл–электролит») были близки к измеренным (рис. 3).

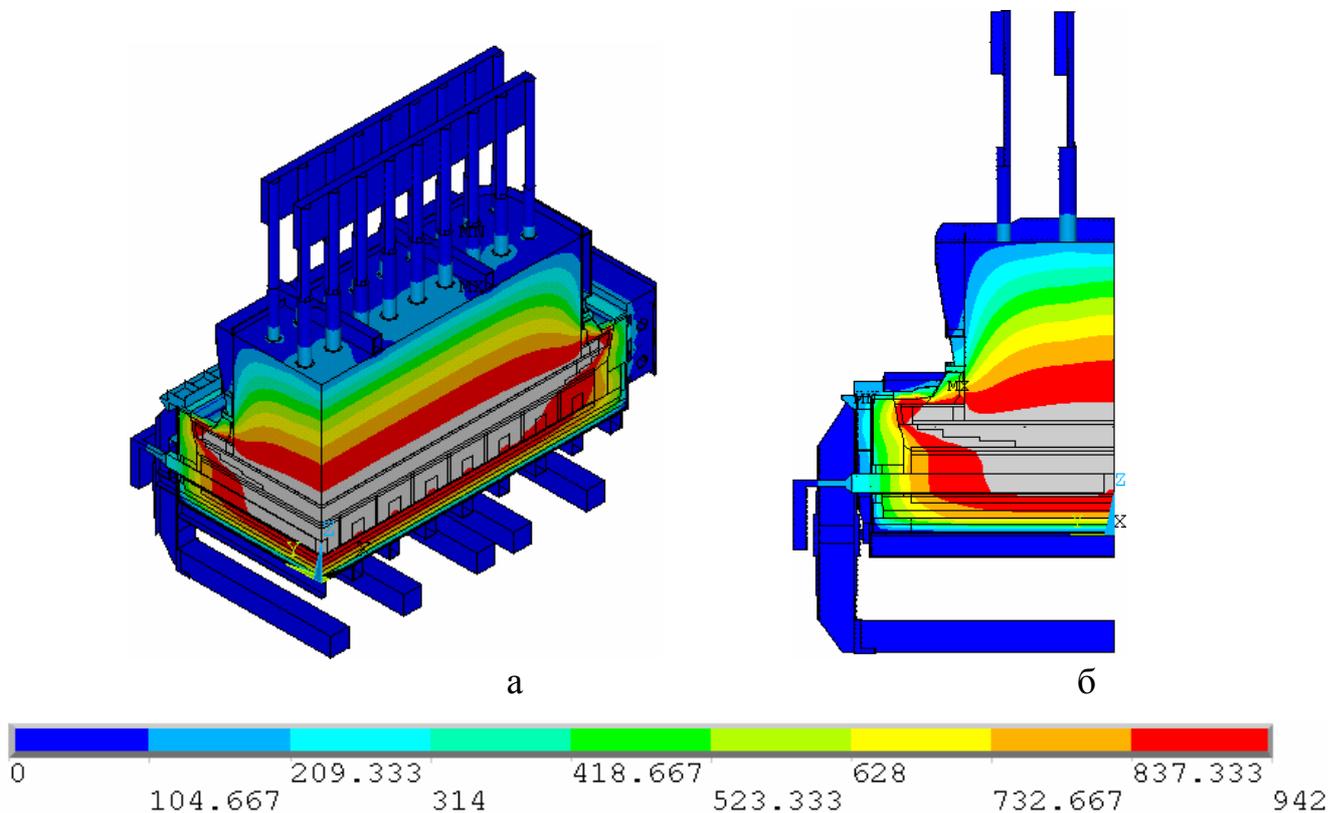


Рис. 3. Температурное поле:  
а – общий вид; б – поперечное сечение

В результате расчетных исследований установлена зависимость производительности электролизера с самообжигающимися анодами от формы токоподводящих элементов [3, 4]. Предложена форма анодных штырей, позволяющая, в сочетании с использованием коллоидной анодной массы, увеличить производительность электролизера при одновременном снижении затрат на электроэнергию. Рекомендованы расчетные зависимости между полюсного пространства электролизера от величины образующихся воздушных прослоек в пространстве «бортовой блок – кожух», обеспечивающие образование защитного слоя гарнисажа.

### *1.3. Отработка технологического процесса гранулирования свинецсодержащих алюминиевые расплавов*

Исследованы теплофизические процессы при получении гранул свинецсодержащего алюминиевого сплава. Антифрикционные сплавы позволяют снизить коэффициент трения и, соответственно, повысить износостойкость и эксплуатационную надежность изготовленных из них частей механизмов. Установлено, что в условиях атмосферного давления и низкой скорости охлаждения (не выше 60 °С/с) при затвердевании наблюдается ликвация свинца по плотности. Поэтому наиболее подходящим здесь является процесс гранулирования, который дает возможность получить в высоколегированных сплавах алюминия с легкоплавкими, практически нерастворимыми в алюминии и резко отличающимися по плотности компонентами (Sn, Pb, Cd, Bi), диспергированную гетерогенную структуру с равномерным распределением включений. Отработка рациональной технологии процесса гранулирования расплавов связана с определением влияния ряда факторов, к которым, в первую очередь, следует отнести скорость охлаждения гранул, их состав и размеры.

Предложена математическая модель теплообмена, на основе которой проведено расчетное исследование охлаждения в водной среде капли расплава различного размера (рис. 4) [5]. С использованием лабораторного эксперимента уточнены краевые условия для моделирования и оценено качество получаемых гранул. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений неразрывности, сохранения импульса и сохранения энергии. Уравнение энергии включает члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение при фазовом переходе в расплаве капли в процессе кристаллизации и закипания

воды. Численное решение задачи проводилось методом контрольного объема с использованием программы Star-CD.

Определена скорость охлаждения каплей расплава системы Al-Pb различного размера и состава, необходимая для получения гранул с равномерным распределением включений Pb (рис. 5, 6).

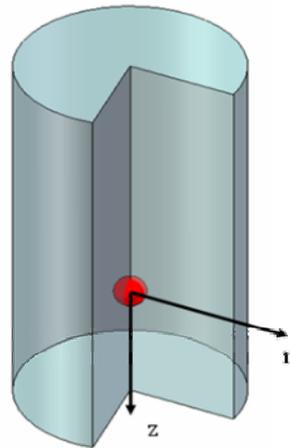


Рис. 4. Расчетная область капли сплава

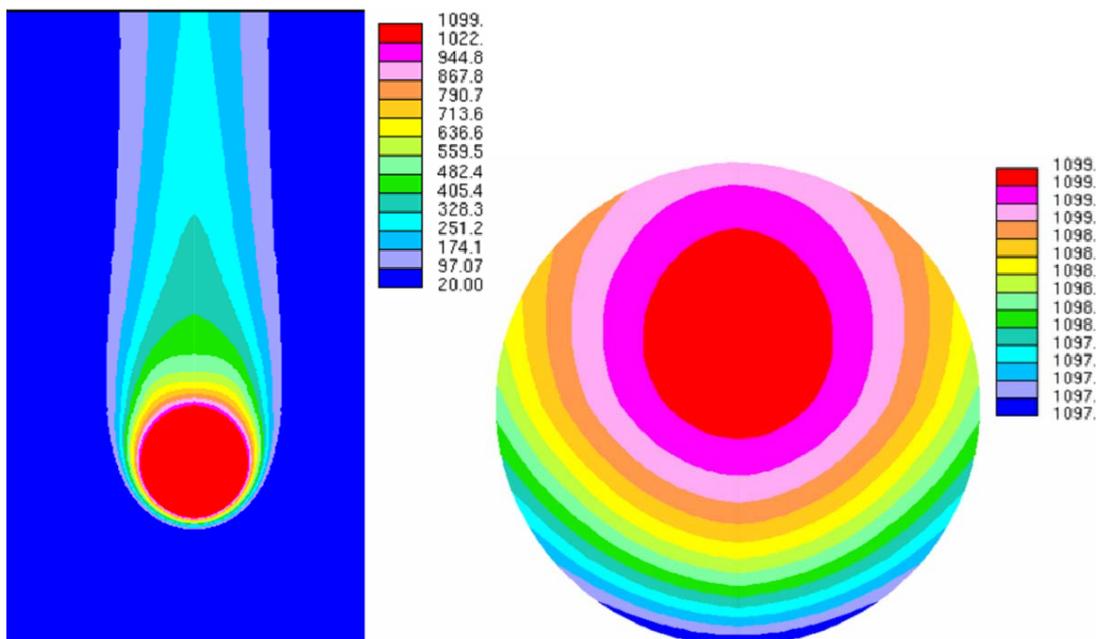


Рис. 5. Температурное поле воздушной среды и капли расплава диаметром 6 мм в момент времени 0,1 сек

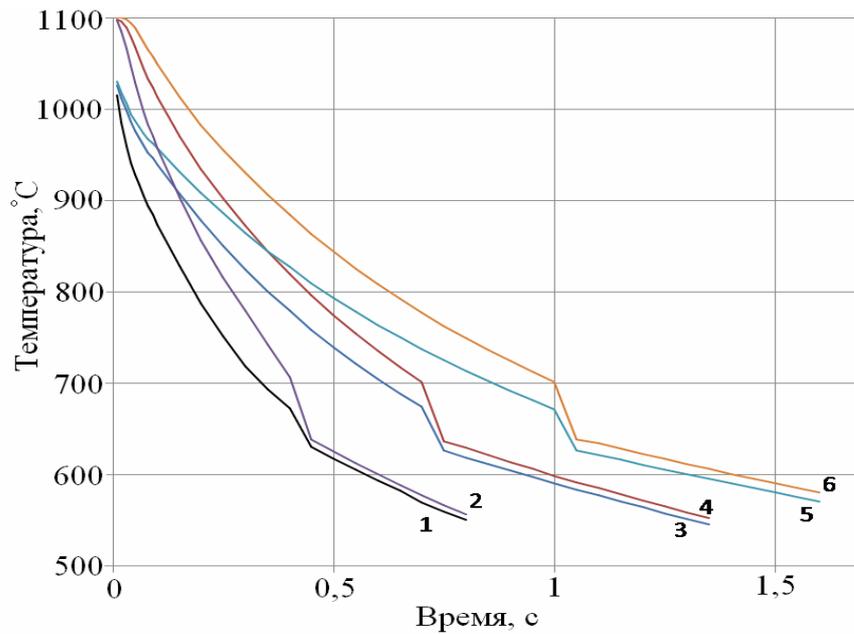


Рис. 6. Зависимость скорости охлаждения капель расплава в воде от их размера и времени движения:

1 и 2 – минимальная и максимальная температура капли диаметром 4,5 мм соответственно; 3 и 4 – то же для капли диаметром 6 мм; 5 и 6 – то же для капли диаметром 7,5 мм

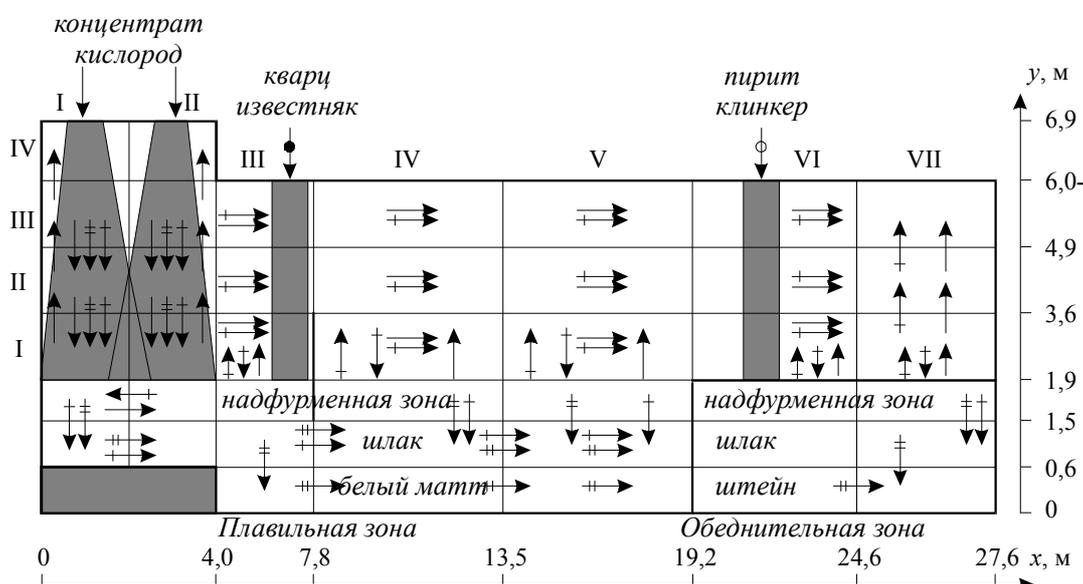
Рекомендованы режимные и конструктивные параметры работы промышленных теплотехнологических установок для получения высококонцентрированных свинецсодержащих алюминиевых гранул [5].

## 2. Медеплавильное производство

Основным направлением в производстве тяжелых цветных металлов является разработка принципиально новых ресурсосберегающих и экологически чистых технологических процессов, к которым относятся различные модификации автогенной плавки сульфидного сырья: взвешенная и кислородно-факельная плавка, плавка Ванюкова и др. Поиск эффективных конструкций и условий работы автогенных энерготехнологических установок представляет собой сложную комплексную проблему, решение которой на современном этапе наиболее рационально методами математического моделирования. Разработаны и исследованы многозональные математические модели сложного теплообмена в печах и агрегатах автогенной плавки сульфидного сырья тяжелых цветных металлов различных конструкций [6-8]. В моделях расчет параметров гарнисажной футеровки учитывает неизотермичность сепарирующих из

факела и ванны на ограждения продуктов плавки, теплоту физико-химических превращений в жидком слое гарнисажа, форму и раскладку кессонов, термодинамические параметры охлаждающего агента, прогрев полидисперсных частиц, рассеяние энергии излучения и продольное результирующее радиационное взаимодействие с окружающей средой.

Дан сравнительный анализ технологической эффективности работы агрегатов. На основе разработанной комплексной трехмерной математической модели теплообмена (рис. 7) получены детальные результаты расчетного исследования теплообмена в новом промышленном агрегате комбинированной автогенной факельно-барботажной плавки (ФБП) медьсодержащего сульфидного сырья.



Римские цифры: I-VII – номера расчетных ярусов по длине и высоте печи

Рис. 7. Геометрическая схема зональной модели ФБА:

### 3. Производство благородных металлов и сплавов.

Технология непрерывного литья является первым и наиболее значимым этапом в достаточно продолжительном и многооперационном производстве золотых ювелирных цепочек. Качество первого полуфабриката, которым является литой пруток, во многом определяет выход годного на всех последующих переделах вплоть до готовой продукции. Вопрос достижения полуфабрикатом необходимого качества включает выполнение следующих условий: равномерное распределение компонентов сплава по его длине и сечению;

микроструктура сплава должна быть гомогенной и состоять из зерен желательного равноосного строения и близкого размера; отсутствие пор и расслоя, трещин и поверхностных дефектов; наиболее специфичному для ювелирного производства – определенному цвету.

На основе разработанной математической модели с использованием программных комплексов Ansys, Procast и LWM, а также промышленных экспериментов изучено влияние интенсивности процессов тепломассопереноса при кристаллизации расплава золотого ювелирного сплава 585 пробы на его гомогенность и стабильность микроструктуры [9-10]. Опытные плавки проводились на установке для непрерывного литья с последующим анализом микроструктуры сплавов методами оптической и электронной микроскопии. Варьировались температура и температурный градиент расплава, линейная скорость кристаллизации. Результаты расчетов и опытных исследований микроструктуры золотого ювелирного сплава позволили оптимизировать скорость его кристаллизации и рекомендовать режимы работы установки. Показано, что наложение дополнительного электромагнитного поля с большей глубиной проникновения в расплав позволяет интенсифицировать процесс тепломассопереноса в расплаве, увеличить турбулентность потока, обеспечить возможность формирования в расплаве кластеров минимального размера и преодолеть имеющиеся ограничения во взаимной растворимости различных компонентов, входящих в состав золотых ювелирных сплавов.

Получены также результаты по повышению энергетической эффективности и надежности работы литейной установки для получения качественных слитков палладия и платины (рис. 8). При этом на основе результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследования процессов тепломассопереноса определены режимные параметры, обеспечивающие исключение поверхностных и внутренних дефектов, а также снижение величины усадочной раковины слитка.

#### Выводы

1. Предложены варианты повышения производительности вращающихся прокаточных печей алюминиевого производства путем форсирования их тепловой мощности, а также осуществление процесса предварительной сушки сырого нефтяного кокса. Результаты

моделирования показали, что предварительная сушка позволяет существенно увеличить производительность печи по прокаленному.

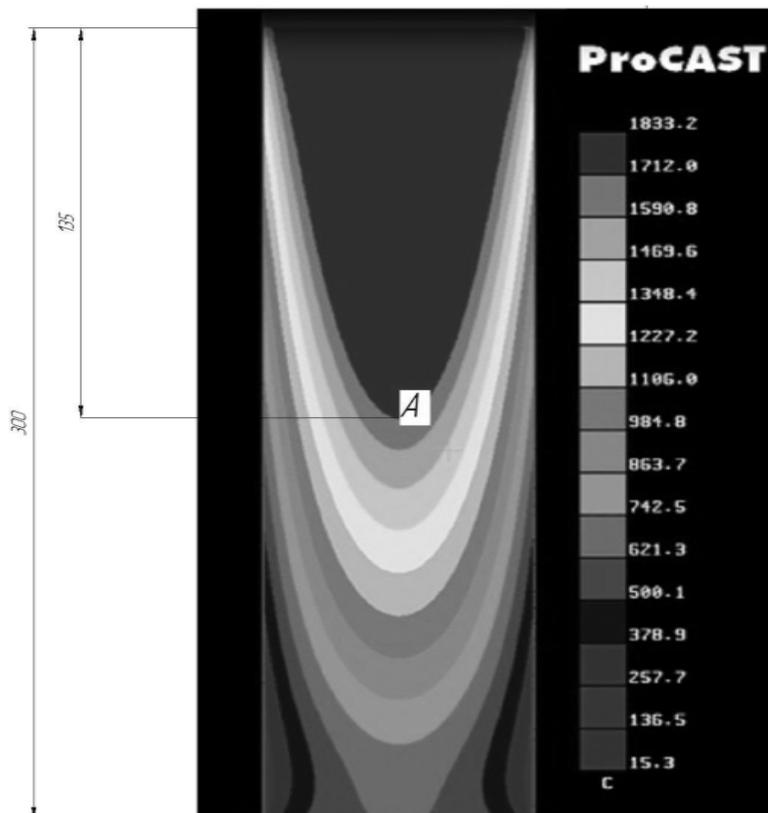


Рис. 8 – Расчетные температурные поля в сечении отливки Pt

2. Усовершенствована трехмерная модель теплообмена электролизера с самообжигающимися анодами, позволяющая учесть при анализе энергоэффективности его работы токораспределение в его объеме, влияние геометрии анодных штырей, состав анодной массы и особенности конструкции футеровки. В результате моделирования установлена зависимость производительности электролизера с самообжигающимися анодами от формы токоподводящих элементов. Показано, что в результате использования анодных штырей плоской формы и коллоидной анодной массы увеличивается производительность электролизера при одновременном снижении расхода электроэнергии. Установлено также существенное влияние воздушных прослоек в пространстве «бортовой блок – кожух» на толщину защитного слоя гарнисажа. Рекомендована расчетная зависимость величины межполюсного пространства от толщины гарнисажа, обеспечивающая его образование.

3. Разработана трехмерная динамическая математическая модель теплообмена при гранулировании металлических расплавов, учитывающая изменение нелинейных граничных условий и фазового состава охлаждающей среды в процессе движения капли различного размера и химического состава. Определена скорость охлаждения капель расплава системы Al-Pb различного размера и состава, необходимая для получения гранул с равномерным распределением включений свинца.

4. На основе разработанных математических моделей и промышленных экспериментов изучено влияние на гомогенность и стабильность микроструктуры интенсивности процессов теплопереноса при производстве лигатур для золотых ювелирных сплавов, непрерывном литье и кристаллизации расплава золотого ювелирного сплава 585 пробы, а также качественных слитков палладия и платины.

#### Литература

[1] Самарянова Л.Б., Лайнер А.И. Технологические расчеты в производстве глинозема.– М.: Metallurgy, 1981. 280 с.

[2] Скуратов А.П., Пьяных А.А. Повышение производительности вращающихся печей для термообработки нефтяного кокса. Кн.: Горение и плазмохимия: Сб. науч. тр. IV Международного симпозиума: Алматы, 12-14 сентября 2007 г.: КазНУ, 2007. С. 64-72.

[3] Скуратов А.П., Пьяных А.А. Численное исследование теплофизических процессов в алюминиевом электролизере. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2009. № 1. С. 230-233.

[4] Скуратов А.П., Пьяных А.А., Скуратова С.Д. Увеличение энергоэффективности алюминиевого электролизера на основе математического моделирования. Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2009. Вып. 5. С. 163-168.

[5] Skuratov A.P., Pinykh A.A. Heat transfer at granulation of lead-containing aluminum alloys in aqueous medium // Thermophysics and Aeromechanics, 2012. Vol. 19, No. 1. P. 123-129.

[6] Skuratov A.P., Skuratova S.D. The mathematical model and investigation of influence of design characteristics on heat transfer in Vanyukov's smelting enegrotechnological complex. Siberian Federal University Journal: «Technique and technologies», 2010. Vol. 3. No. 3. P. 264-271.

[7] Skuratov A.P., Skuratova S.D. The compute research of mode parameters influence on the furnace heat work in Vanyukov's smelting energotechnological complex. Siberian Federal University Journal: «Technique and technologies», 2010. Vol. 3. No. 4. P. 406-410.

[8] Скуратов А.П., Григорьева О.М, Журавлев Ю.А. Применение математического моделирования к исследованию теплообмена в энерготехнологическом комплексе плавки Ванюкова. Изв. вузов. Цветная металлургия, 1989. № 4. С. 100-106.

[9] Павлов Е.А., Скуратов А.П., Гурская В.А. и др. Процессы тепломассопереноса в технологии непрерывного литья золотых ювелирных сплавов. Цветные металлы – 2010: Сб. докл. второго междунар. конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010. С. 333-334.

[10] Павлов Е.А., Скуратов А.П., Гурская В.А. и др. Исследование влияния скорости кристаллизации на свойства золотого ювелирного сплава 585 пробы. Цветные металлы – 2011: Сб. докл. второго междунар. конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2011. С. 526-527.