

УДК 621.74:
669.715:
669.046.5:
004.94

P.L. Kokovin
E.A. Lozin
O.A. Broytman
S.A. Borodin
Yu.B. Vlasov

Аннотация

Summary

Разработка цифрового двойника процесса полунепрерывного литья алюминиевого сплава на базе численной модели и данных эксперимента

Development of a digital twin of the semi-continuous casting process of aluminum alloy based on a numerical model and experimental data

П.Л. Коковин, Е.А. Лозин, О.А. Бройтман, С.А. Бородин, Ю.Б. Власов

В статье представлена методика исследования процессов полунепрерывного литья алюминиевых сплавов при использовании цифрового двойника, подготовленного на базе компьютерной модели, реализованной в среде СКМ «ПолигонСофт», и данных измерений на производстве.

Ключевые слова

Полунепрерывное литье, алюминиевые сплавы, моделирование, цифровой двойник, тепловые процессы, термометрирование, плоский слиток.

The article dedicated to methodology for studying the processes of semi-continuous casting of aluminum alloys using a digital twin based on a computer model created in POLIGONSOFT casting simulation software and real-life measured data.

Key words

Semi-continuous casting, aluminum alloys, modeling, digital twin, thermal processes, temperature measurement, flat ingot.

Введение

В современной технике широко распространен рациональный подход, в рамках которого натурные исследования и испытания дополняются результатами вычислительных экспериментов с использованием цифрового двойника (ЦД) изучаемого объекта [1]. При этом результаты испытаний на натуре одновременно служат основой для проверки адекватности и совершенствования входящей в состав ЦД компьютерной модели. Обращение к подобным практикам позволяет получить наиболее полные представления о функционировании исследуемого объекта и протекающих при этом процессах.

При изготовлении слитков методом полунепрерывной разливки возможности проведения всестороннего экспериментального исследования на машине полунепрерывного литья ограничены известными обстоятельствами, такими как высокие температуры, сложность и трудоемкость проведения корректных измерений параметров процесса в теле слитка и разных частях установки, риски, сопряженные с вмешательством в конструкцию оборудования на производстве. С учетом работы с разными сплавами, режимами литья, варьированием характеристик кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения (ЗВО) и др. число экспериментов, потребных для составления

наиболее представительной картины наблюдений, оказывается слишком высоким, их реализация крайне дорога и трудоемка для осуществления на действующем производстве.

Для преодоления неминуемой фрагментарности данных, возможных к извлечению в рамках доступных к выполнению на практике испытаний, целесообразно применить компьютерную модель, эксплуатация которой не предусматривает ограничений на объем и разнообразие вариантов постановки задачи анализа условий литья, включая исследование процесса в пограничных состояниях, выявление аварийных режимов. Созданный на базе модели ЦД может иметь статус цифрового прототипа при проектировании оборудования или необходимости его модернизации и переналадки, либо применяться для получения новых данных при углубленном изучении внедренного режима литья и способов его совершенствования.

Постановка задачи

Для комбинированных натурных и расчетных исследований был выбран слиток сечением 500×2000 мм из сплава АМг6, производимый в условиях АО «КУМЗ». Слиток изготавливается на установке полунепрерывной разливки вертикального типа, длина получаемой заготовки до 10000 мм.

Характеристики процесса литья и установки даны в **табл. 1**.

Основным предметом исследования являлись тепловые условия литья и затвердевания слитка, оказывающие решающее влияние на формирование его качества. Исследование требовалось осуществить путем прямых измерений изменяющихся во времени температур в теле слитка и при выполнении расчетов на модели, воспроизводящей те же условия литья, что реализованы на практике.

По результатам проведения указанных мероприятий необходимо было получить ЦД для извлечения дополнительных данных о протекании процесса литья. После отладки работы ЦД его основные характеристики могут быть приняты за основу при расчетном анализе процесса литья других слитков сходного вида из алюминиевых сплавов на установках АО «КУМЗ» подобного типа, но с некоторыми отличиями по габаритам и устройству системы охлаждения.

Подготовка компьютерной модели

Цифровая модель процесса была подготовлена в среде системы компьютерного моделирования (СКМ) «ПолигонСофт». Настоящая СКМ является специализированным продуктом для анализа технологий литья, что позволяет

Таблица 1

Параметр		Характеристика процесса и установки полунепрерывного литья
Марка сплава		АМг6
Габариты готового слитка, мм		500×2000×10000
Кристаллизатор		Водоохлаждаемый из алюминиевого сплава
Скорость литья в установившемся режиме, мм/мин		43
Поступление металла в кристаллизатор		Из лотка через фильтр-распределитель
Средняя температура расплава в лотке, °С		685
Средняя температура металла вблизи уровня налива в кристаллизатор, °С		640
Последовательность охлаждения	В кристаллизаторе	Высота кристаллизатора 140 мм, уровень металла 55 мм от верхней кромки
	Воздушный зазор	40 мм от нижней кромки кристаллизатора
	Вторичное водяное	Зона шириной 200 мм, ограниченная резиновыми водосъемами; вода поступает из форсунок в нижней части кристаллизатора
	Воздушное в камере для готового слитка	Ниже уровня водосъемов

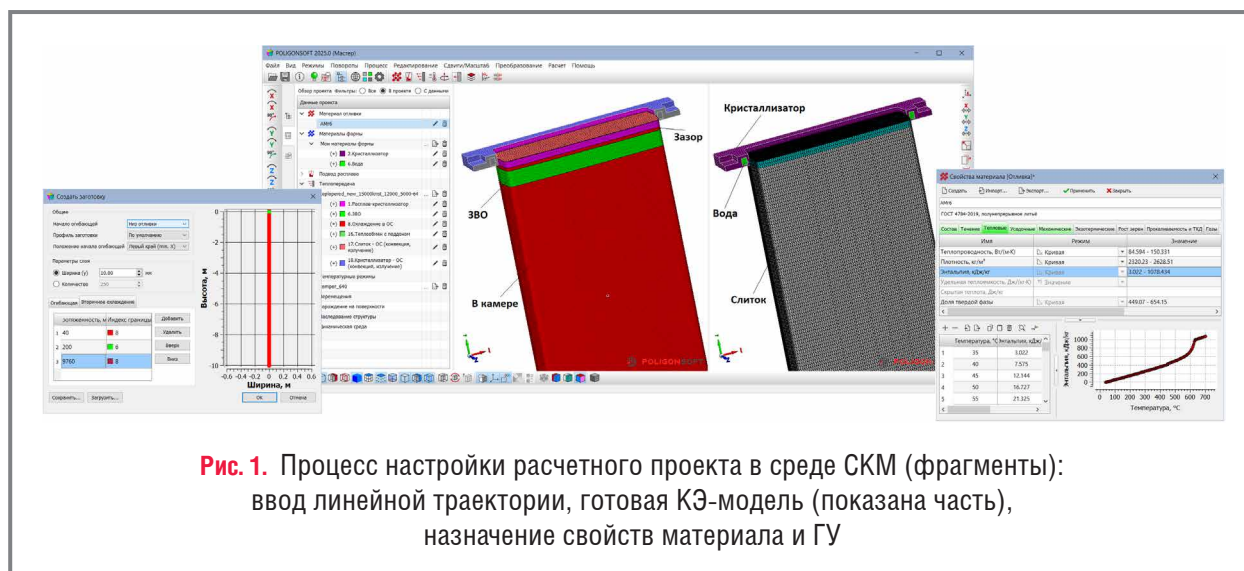


Рис. 1. Процесс настройки расчетного проекта в среде СКМ (фрагменты): ввод линейной траектории, готовая КЭ-модель (показана часть), назначение свойств материала и ГУ

использовать имеющиеся в ее составе готовые численные модели процессов формирования металлических заготовок [2, 3]. Доступный в составе СКМ вид анализа условий теплообмена между телами при скользящем контакте в комбинации с возможностью учета движения граничных условий (ГУ) позволяет осуществлять постановку задачи моделирования непрерывной и полунепрерывной разливки слитков уже с использованием базового функционала [4, 5]. При работе с последними версиями СКМ для этих целей следует использовать интегрированный в ее состав модуль непрерывной разливки [6], позволяющий автоматизировать и ускорить процесс настройки проекта для решения задачи в расширенной постановке, а затем выполнить расчетное исследование наиболее эффективным способом.

Концепция моделирования в СКМ предполагает ввод геометрических (3D-модель) и негеометрических (свойства материалов, ГУ, прочие характеристики для описания исследуемого процесса или объекта) исходных данных. Таким образом удается присвоить каждому объему в составе сеточной модели (слиток, кристаллизатор, поддон/затравка и т.д.) определенные тепловые и физико-механические свойства и учесть их взаимодействие с окружающей средой (ЗВО, протяжка на воздухе и т.д.). Геометрическая модель требует дискретизации, сеточного представления в системе моделирования для численного решения задачи затвердевания. Анализ затвердевания осуществляется на основе численного решения уравнения нестационарной теплопроводности (Фурье). Несмотря на относительную простоту конструкции непрерывнолитых

слитков, при расчетном исследовании условий литья в современных условиях предпочтение принято отдавать численному решению [6...10], как наиболее универсальному способу, позволяющему исключить присутствие ряда допущений, собственных частным аналитическим решениям [7], а также учесть все особенности геометрии слитка и элементов установки, разнообразие условий теплоотвода в кристаллизаторе, ЗВО и др.

Конечно-элементная (КЭ) сеточная 3D-модель в рассматриваемом случае включала слиток, кристаллизатор и некоторые другие детали конструкции установки (рис. 1). При использовании «ПолигонСофт» тело слитка в составе сеточной модели генерируется автоматически с учетом заданной линейной или криволинейной траектории любой сложности. При решении задачи формирования слитка используется подход, предполагающий постепенное вовлечение в расчет новых участков сетки слитка по мере его прироста во времени, поэтому уже в исходной геометрической модели должен присутствовать его полноразмерный прототип.

В процессе назначения температурно-зависимых свойств сплава и материалов, входящих в состав установки, использовали сведения из базы данных, входящей в состав СКМ, литературные источники и результаты термодинамического моделирования. В качестве базовых, подлежащих в дальнейшем уточнению, коэффициентов теплоотдачи, необходимых к вводу в ГУ II рода, назначаемых для расчета теплообмена с поверхности слитка в разных частях установки, использовали известные из литературы усредненные

значения [7] и сведения из базы данных СКМ.

Проведение измерений на натуре

Экспериментальное исследование поля температур по сечению слитка в процессе затвердевания выполняли методом вмораживания термопар [7, 11, 12]. Для обеспечения точности позиционирования термопар в слитке использовали предварительно изготовленную стальную рамку (рис. 2), которую надлежало вводить в расплав при помощи быстрого адаптера для ее кратковременного направления

в жидкой части слитка, вплоть до начала вмержания при перемещении в зоне, отличающейся наличием твердой корки достаточной толщины. Фактическое положение каждой термопары после завершения эксперимента уточняли при разрезке готового слитка. Размеры рамки с закрепленными на ней термопарами и ее планируемое положение в слитке выбирали с учетом технологически возможных условий ввода в доступной открытой части зеркала металла за пределами зоны размещения фильтра-распределителя, а также исходя из соображений техники безопасности.

В процессе проектирования оснастки для организации термометрирования расчетным путем выполнили проверку захлаживающего влияния, оказываемого рамкой на затвердевающий металл. Результаты моделирования показали, что использование прутка $\varnothing 10$ мм при изготовлении этой сварной конструкции не окажет сколь-либо существенного влияния на температуры в расплаве. Для снижения кратковременного захлаживающего влияния до момента прогрева оснастки предусмотрели вылет концов рабочих спаев семи нихро-сил-ниловых (N) кабельных термопар на 30 мм под нижней кромкой рамки. Регистрацию термоЭДС термопар выполняли при помощи многоканального устройства сбора данных YOKOGAWA MW100.

Момент ввода рамки с термопарами в расплав был выбран по результатам предварительных расчетов. Было показано, что для применимых скоростей литья с учетом возможного разброса коэффициентов теплоотдачи, определяющих тепловой поток с разных участков поверхности слитка, установившийся режим литья наступает не позднее, чем после получения заготовки длиной около 1000 мм.

В дополнение к перечисленному в процессе литья измеряли температуру воды на выходе из форсунок кристаллизатора (поступает затем в ЗВО), расход воды, температуру в камере, куда перемещается готовая часть слитка, и в донной части слитка при помощи термопары, размещенной на рабочей поверхности поддона, а также периодически контролировали глубину лунки при помощи щупа.

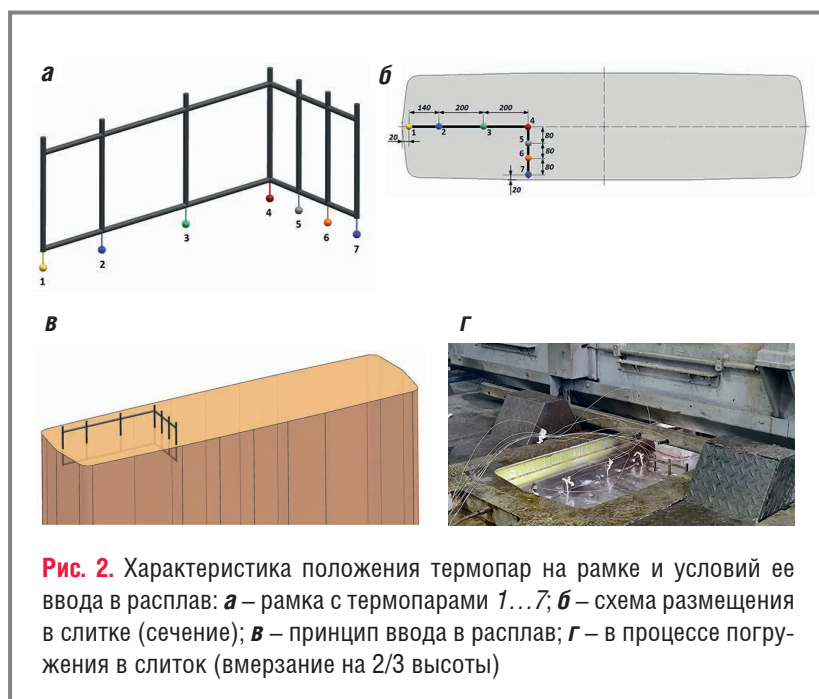


Рис. 2. Характеристика положения термопар на рамке и условий ее ввода в расплав: **а** – рамка с термопарами 1...7; **б** – схема размещения в слитке (сечение); **в** – принцип ввода в расплав; **г** – в процессе погружения в слиток (вмержание на 2/3 высоты)

Таблица 2

Участок поверхности	Коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²К)	Средняя температура контактирующей среды, °С
Слиток – водоохлаждаемый кристаллизатор	15	25
Слиток – вода (ЗВО)	12	24
Слиток – воздушная атмосфера камеры	5	64

Результаты и обсуждение

В результате проведенных работ был сформирован ЦД, пригодный как для извлечения дополнительных данных о процессе литья при реализации опробованного режима, так и диагностики последствий внесения тех или иных изменений в технологию. Наладку и верификацию компьютерной модели осуществляли путем сопоставления данных моделирования и измерений. Высокая точность моделирования достигается при назначении достоверных коэффициентов теплоотдачи, характеризующих теплоотвод на разных участках поверхности слитка. По результатам выполнения серии расчетов найдено решение обратной задачи по установлению оптимальных значений средних коэффициентов теплоотдачи (табл. 2).

Данные расчетов в сравнении с экспериментом приведены на рис. 3. Максимальное расхождение между расчетными и измеренными значениями температур для разных контрольных точек составляет 2...6%, что следует признать удовлетворительным.

Фрагменты визуализации процесса литья на разных этапах, представленные в постпроцессоре СКМ, показаны на (рис. 4, а). При использовании моделирования картина распределения температур и доли жидкой фазы доступна для наблюдения по всему телу слитка в любой момент времени. В установившемся режиме литья (рис. 4, б) наблюдается стабилизация лунки (условно, по изоповерхности 50% жидкой фазы) на уровне 328 мм, а ниже ЗВО на поверхности слитка

возникает участок вторичного разогрева, наиболее выраженного на стороне широкой грани.

Осредненные результаты сопоставления исходных контрольных глубины лунки в разных частях слитка вблизи момента наступления установившегося режима с расчетными данными о присутствии твердой фазы приведены на рис. 5.

Если принять в качестве допущения примерно равную силу давления на шуп, то остановка при погружении может наступать как в связи с достижением участка со сформированным скелетом твердой фазы, так и при затруднении продвижения между разрозненными кристаллами в расплаве при повышенной концентрации твердого. Рассуждая об условиях контроля по шупу на разном удалении от стенки, во внимание следует принять также известные представления о типичных закономерностях формирования структуры при затвердевании слитка. В связи со всем упомянутым, исход осуществления грубого, но информативного вида контроля с измерением глубины проникновения шупа в расплав зависит от комплекса факторов, определяющих структурированность двухфазной зоны, и позволяет регистрировать в большей мере достижение определенных прочностных характеристик, нежели положение изоповерхности, отражающей неизменное содержание твердого.

Установленные при разработке ЦД характеристики теплоотвода от слитка и ряд других настроек модели могут быть использованы при анализе процесса литья на установках подобного типа разных сплавов на основе алюминия с варьированием

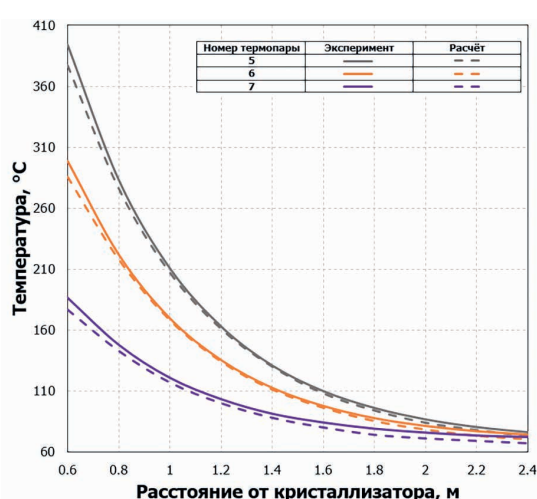
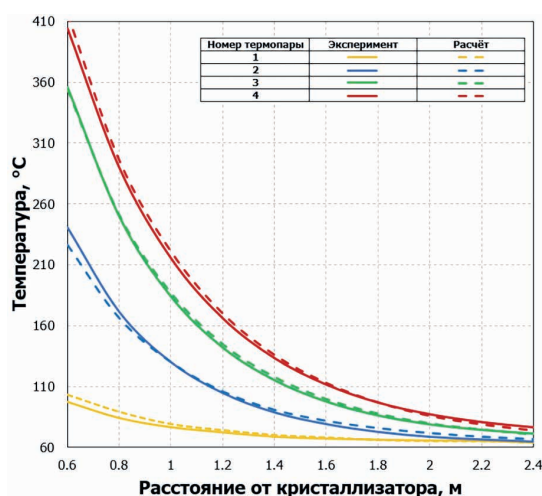
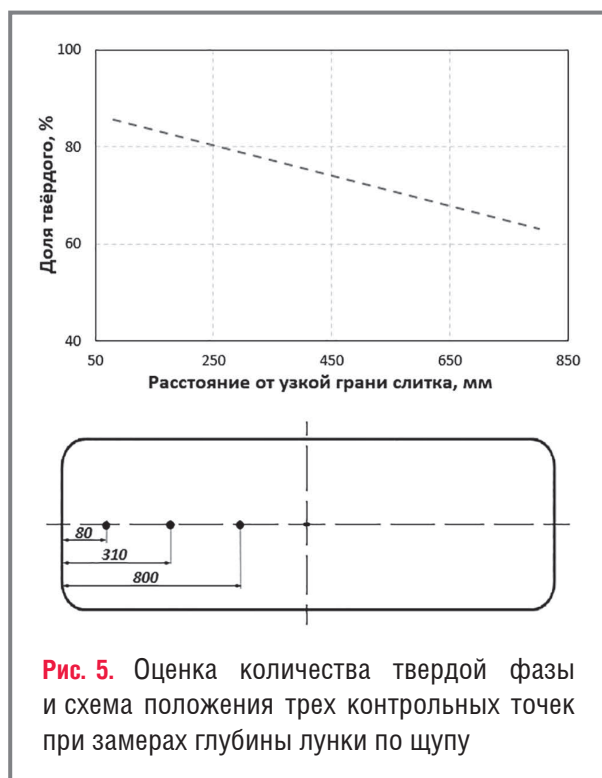
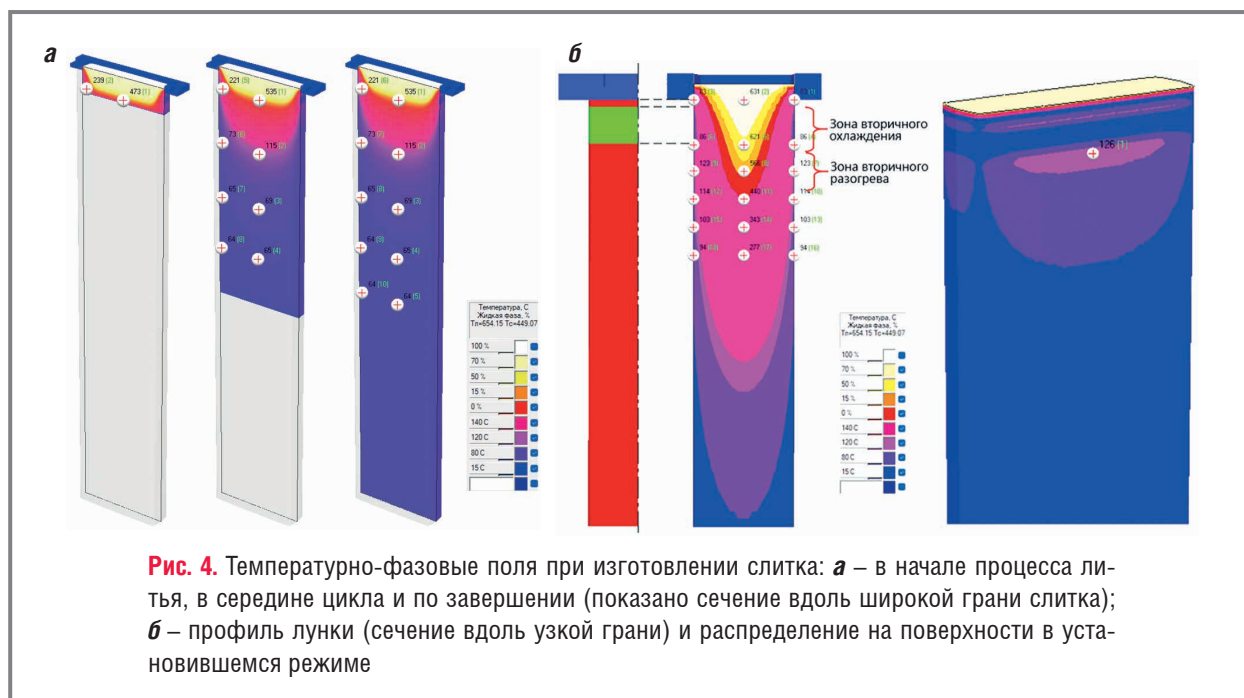


Рис. 3. Изменение температур в контрольных точках по мере удаления от кристаллизатора (во времени) согласно данным эксперимента (сплошные линии) и расчета (пунктир)



скоростей и введением корректировок в систему охлаждения.

Продолжением работ стало исследование условий производства слитка тех же габаритов из сплава марки Д19С при разных скоростях литья и изменений протяженности ЗВО. Полученные расчетным способом характеристики

процесса в установившемся режиме литья сведены в **табл. 3**. Время достижения установившегося режима почти не зависит от разброса скоростей литья в исследованном диапазоне. Характерные картины распределения полей температур и жидкой фазы в зоне присутствия лунки для минимальной и максимальной скорости литья сплава Д19С, а также в сравнении со случаем выпуска слитка из АМГ6, представлены на **рис. 6**.

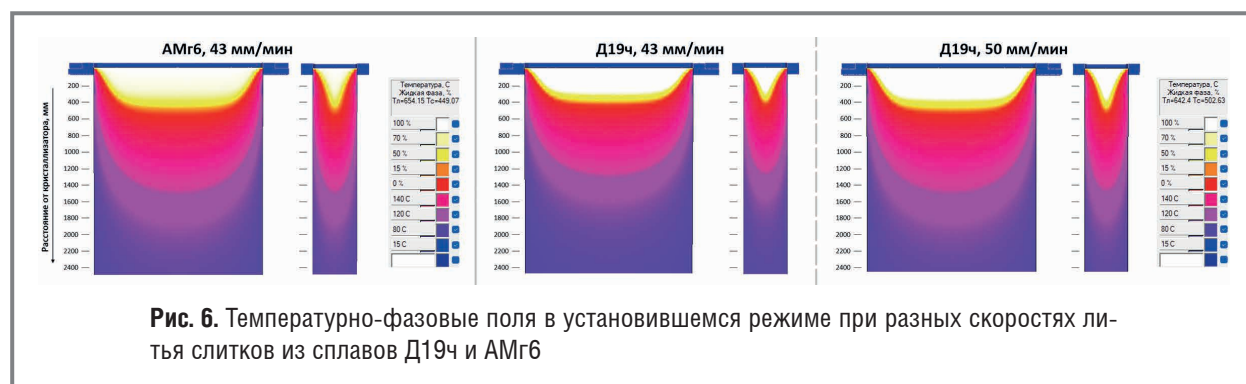
Интервал затвердевания АМГ6 на 50% шире, чем у сплава Д19С, что способствует формированию более протяженной двухфазной зоны. Увеличение скорости литья до рассмотренного предела сопровождается относительно небольшим увеличением лунки и в тепловом отношении не содержит рисков.

В ходе вычислительных экспериментов показано, что при использовании схемы охлаждения, предполагающей довольно узкую ЗВО, возникает заметная чувствительность температурного поля всего слитка к уровню температур в атмосфере камеры. Настоящее наблюдение открывает некоторые дополнительные возможности, связанные с пассивным влиянием на режим формирования слитка.

Сопряженный с тепловыми расчетами анализ напряженно-деформированного состояния и склонности к образованию усадки в теле рассмотренных слитков не выявил связанных проблем качества в пределах исследованных

Таблица 3

Сплав	AMг6	Д19ч				
Скорость литья, мм/мин	43		45	47	50	50
Ширина ЗВО, мм	200					300
Глубина лунки (по 50% жидкой фазы, от нижней кромки кристаллизатора), мм	328	255	278	300	332	325
Время стабилизации положения изоповерхности 50% жидкой фазы, мин	16	19	19	19	20	19,5
Температура поверхности на выходе из кристаллизатора (среднее), °С	124	132	134	136	138	138
Температура вторичного разогрева поверхности (max), °С	127	133	135	137	140	125



режимов. По результатам анализа показан умеренный уровень напряжений в рассмотренном диапазоне скоростей литья сплава Д19ч, склонность к деформации слитков оценивается как низкая, что в совокупности не приводит к возникновению трещин и короблению. Выраженная направленность затвердевания во всех рассмотренных режимах литья исключает образование макропористости, а сравнительно умеренная протяженность двухфазной зоны определяет невысокую склонность к образованию микропористости в осевой области.

Упомянутые результаты прогноза качества слитков имеют самостоятельную ценность и являются основой при выборе направления совершенствования технологий литья при помощи компьютерного моделирования. Дальнейшее же развитие ЦД процессов полунепрерывного литья слитков планируется выполнить с использованием производственной статистики результатов контроля качества продукции.

Заключение

Показанная в настоящей работе техника исследования условий изготовления слитков из алюминиевых сплавов с использованием ЦД позволяет извлечь значительный объем данных в рамках диагностики процесса литья и отличается широкими возможностями в части организации вычислительных экспериментов. Точность работы входящей в состав ЦД тепловой модели процесса напрямую связана со вводом достоверных теплофизических и физико-механических свойств материалов и характеристик теплоотдачи от разных участков слитка.

Опыт расчетных исследований в приложении к задачам непрерывной и полунепрерывной разливки показывает наибольшую чувствительность к погрешностям при назначении коэффициентов теплоотдачи, определяющим теплоотвод с поверхности слитка, нежели чем при вводе свойств материала.

Для установления достоверных значений коэффициентов теплоотдачи целесообразно

руководствоваться методиками, основанными на решении обратной задачи непосредственно с использованием данных температурных измерений на производстве.

Процессы создания универсального ЦД, совершенствования и расширения его функционала при использовании показанной методики связаны с непрерывным пополнением объема данных, измеренных на натуре (температуры, параметры процесса литья, характеристики качества слитков). Соответствующие измерения могут быть выполнены в рамках организации работ с термометрированием в объеме слитков с последующим разрушающим контролем, что позволит извлечь максимум данных. Иная стратегия может быть связана с накоплением и систематизацией данных измерений температур в разных участках поверхности слитков и элементах установки, предпринимаемым в рамках реализации текущих производственных процессов, с установлением взаимосвязей с режимами работы оборудования и параметрами качества продукции, выявляемыми в ходе стандартных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 2021-57700.37.** Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: РСТ, 2021. 11 с.

2. **Монастырский А.В.,**

Власов Ю.Б. POLIGONSOFT для литейного производства. // Литейное производство. 2022. №8. С. 31–37.

3. **Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Абрамов А.А.** Физико-математические основы компьютерного моделирования литейных процессов // Сб. ЦНИИ Материалов – 90 лет в материаловедении. СПб, 2002. С. 151–176.

4. **Агалаков В.В., Кулинский А.И., Бройтман О.А.** Моделирование процесса полунепрерывной разливки крупногабаритного магниевого слитка // Сб. Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности. СПб.: Изд-во СПбГПУ. 2005. С. 45–49.

5. **Срыбник А.Д., Бройтман О.А., Тихомиров М.Д.** Тепловые процессы при непрерывном литье // Материалы IV международного симпозиума ювелиров. СПб., 2005. С. 146–155.

6. **Монастырский А.В.** Компьютерное моделирование тепловых и фазовых полей при непрерывном литье сляба // Литейщик России. 2018. №5. С. 33–38.

7. **Кац А.М., Шадек Е.Г.** Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983. 208 с.

8. **Erisov Y., Surudin S., Bobrovskij I., Jiang C., Khamrayev B.** The End-to-End Simulation of Semi-Continuous Casting and Subsequent Hot Rolling with Account of Microstructure // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 822. Pp. 11–15.

9. **Amratav N., Kumar K., Pillai M.** Computer Simulation of Continuous Casting Processes: A Review // Advances in Materials. 2021. Vol. 10. No. 3. Pp. 31–41.

10. **Bezrukikh A.I., Baranov V.N., Konstantinov I.L. et al.** Modeling of Casting Technology of Large-Sized Ingots From Deformable Aluminum Alloys // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2022, Vol. 120. Pp. 761–780.

11. **Овсянников Б.В., Замятин В.М., Разинкин А.В., Мушников В.С.** Влияние скорости литья на процесс кристаллизации и структуру крупногабаритного плоского слитка из сплава 1163 // Технология легких сплавов. 2013. №4. С. 169–173.

12. **Овсянников Б.В., Кожекин А.Е., Замятин В.М., Колобнев Н.И.** Влияние металлургических и технологических факторов на склонность к образованию кристаллизационных трещин плоских слитков из алюминиевого сплава 1370. // Цветные металлы. 2007. №6. С. 91–94.

Сведения об авторах

Коковин Павел Леонидович – гл. металлург – начальник ОГМет АО «Каменск-Уральский металлургический завод»; аспирант, кафедра «Литейное производство и упрочняющие технологии», Институт новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Лозин Евгений Алексеевич – вед. инженер-технолог по литью твердых сплавов АО «Каменск-Уральский металлургический завод» АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Свердловская обл., г. Каменск-Уральский. Тел.: +7(3439)39-51-54. E-mail: for_mtv01@mail.ru

Бройтман Олег Аркадьевич – канд. техн. наук, руководитель по литью и термообработке, ГК «СиСофт», Москва.

Бородин Степан Александрович – гл. руководитель проектов моделирования. ГК «СиСофт».

Власов Юрий Борисович – руководитель направления ГК «СиСофт». Тел.: +7(495)069-44-44. E-mail: polygon@csdev.ru, sales@csdev.ru