



The choice of some of the most effective technical decisions is made on the basis of analysis of mathematical modeling results and new methods of improvement of continuous pouring technology and construction of MNLZ are offered.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, С. М. КАБИШОВ, И. А. ТРУСОВА, БНТУ,
А. В. МАТОЧКИН, ГНПО «Белстанкоинструмент»

УДК 621.746.5

РАЗРАБОТКА И ВЫБОР МЕТОДОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ МНЛЗ НА БАЗЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Прогресс в развитии конструкций, автоматизации и управления в металлургии в последние десятилетия привел к более высокому уровню использования машин непрерывного литья заготовок при производстве металлопродукции. Несмотря на постоянное расширение марочного сортамента сталей, разливаемых на современных МНЛЗ, повышение скорости разливки, перед производителями оборудования и его потребителями по-прежнему стоят проблемы обеспечения требуемого качества литой стали.

В настоящее время на рынке металлургического оборудования представлен ряд технических решений, которые позволяют повысить производительность МНЛЗ и решить ряд известных проблем в области качества непрерывнолитых заготовок. В данной работе на основании анализа результатов математического моделирования сделан выбор некоторых наиболее эффективных, на наш взгляд, технических решений и предложены новые методы совершенствования технологии непрерывной разливки и конструкции МНЛЗ.

В качестве математического аппарата при проведении вычислительных экспериментов была использована модель теплового и напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе непрерывной разливки, основные положения которой изложены в работе [1]. Адекватность данной модели была подтверждена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных.

С использованием указанной математической модели выполнена серия расчетов. В качестве примера и объекта дальнейшего анализа рассмотрим результаты моделирования процесса кристаллизации заготовки сечением 300×400 мм,

разливаемой со скоростью 0,6 м/мин в условиях МНЛЗ-3 РУП «БМЗ». При расчетах принимали следующие значения основных технологических и теплофизических параметров: температура ликвидуса $T_{лик} = 1773$ К, температура солидуса $T_{сол} = 1703$ К, скрытая теплота кристаллизации $L = 255000$ Дж/кг, плотность $\rho = 7200$ кг/м³, теплоемкость жидкой стали $c_{лик} = 690$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности расплава $\lambda_{лик} = 30$ Вт/(м·К), коэффициент линейного расширения стали $\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹, коэффициент теплоотдачи для широких граней на первом участке кристаллизатора (до 0,5 м от зеркала расплава) задавали $\alpha_{ш.г.} = 800$ Вт/(м²·К), а для узких $\alpha_{у.г.} = 600$ Вт/(м²·К), на втором участке (от отметки 0,5 м до конца кристаллизатора) – 200 Вт/(м²·К) для обеих граней; начальная температура расплава на мениске – 1783 К; средний коэффициент теплоотдачи в ЗВО $\alpha_w = 300$ Вт/(м²·К). Следует отметить, что коэффициенты теплообмена в кристаллизаторе и ЗВО задавали по результатам анализа натуральных экспериментов. Расчет температур, напряжений и деформаций осуществляли для точек, расположенных в центре заготовки и серединах верхней и боковой грани.

В данном случае рассматривали процесс изменения температур, термонапряжений и деформаций на протяжении всего периода затвердевания слитка при условии поддержания симметричного температурного поля относительно оси заготовки, т. е. при условии нормальной работы систем качания и охлаждения кристаллизатора, механизмов разливочной дуги и зоны вторичного охлаждения.

Результаты расчетов приведены на рис. 1.

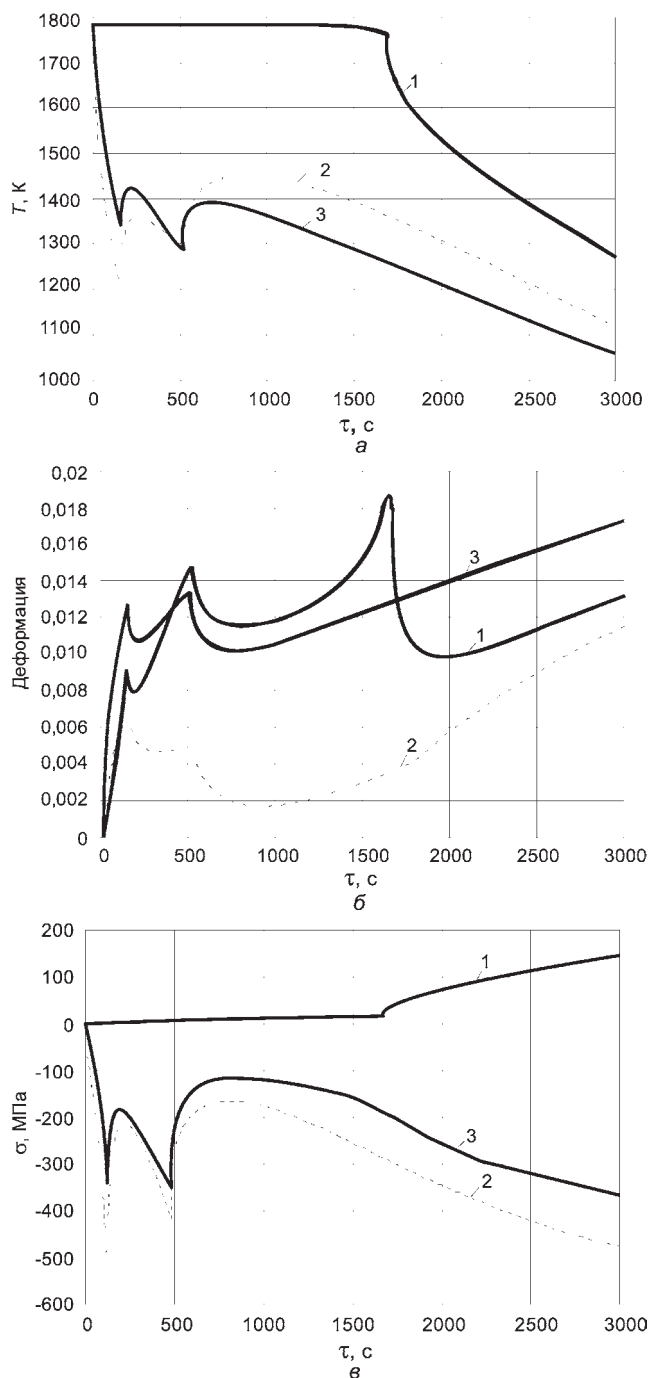


Рис. 1. Изменение температур (а), деформаций (б) и термо-напряжений (в) в характерных точках сечения заготовки размерами 300×400 мм, разливаемой со скоростью 0,6 м/мин в условиях МНЛЗ-3 РУП «БМЗ»

Из рисунка видно, что изменение условий охлаждения на границах зон приводит к скачкообразному изменению температур, напряжений и деформаций на поверхности заготовки. В точках 2, 3 характер линий напряжений резко изменяется на выходе из кристаллизатора, в конце зоны вторичного охлаждения (ЗВО), а в центре (точка 1) возникают растягивающие напряжения после завершения кристаллизации металла. Спустя 2100 с после начала процесса наиболее опас-

ные растягивающие напряжения на оси заготовки достигают 80 МПа и в дальнейшем продолжают расти. Несмотря на относительно невысокий уровень растягивающих напряжений, они могут явиться причиной появления дефектов в виде внутренних трещин. Следует учитывать, что механические свойства стали в осевой зоне несколько ниже, чем у металла в остальном объеме заготовки. Это вызвано более высокой концентрацией ликватов (вредных примесей, неметаллических включений, углерода), наличие которых на фоне растягивающих напряжений и деформаций может привести к нарушению сплошности и образованию трещины.

В момент выхода из кристаллизатора на затвердевшую корочку воздействуют не только термические напряжения. Ферростатическое давление жидкой стали может вызвать вспучивание корочки, а при недостаточной толщине последней либо при наличии дефектов в виде трещин – прорыв расплава. Помимо этого, заготовка воспринимает механические воздействия со стороны опорных и поддерживающих роликов МНЛЗ. Данное обстоятельство также может отрицательно сказаться на качестве продукции. В связи с этим подробнее остановимся на методах совершенствования технологии разлива и конструкции МНЛЗ, которые направлены на устранение указанных недостатков либо минимизацию их отрицательного воздействия.

Этап формирования непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ. Формирование твердой корочки непрерывнолитой заготовки в пределах кристаллизатора является основой качественных характеристик всего слитка в целом. Нарушения режимов охлаждения (несимметричность по периметру заготовки, избыточная либо недостаточная интенсивность охлаждения), механические воздействия со стороны стенок кристаллизатора, низкое качество шлакообразующей смеси, колебания уровня зеркала расплава в кристаллизаторе и другие причины могут привести к возникновению поверхностных, а при дальнейшей кристаллизации и внутренних дефектов в непрерывнолитой заготовке.

В настоящее время производители металлургического оборудования предлагают ряд конструктивных и технологических решений, которые позволяют улучшить качество продукции и повысить производительность оборудования.

Прежде всего следует остановиться на системе качания кристаллизатора, которая во многом определяет стабильность процесса разлива и качество поверхности заготовки. На данный момент

практически все строящиеся и модернизируемые МНЛЗ оснащаются электрогидравлическими системами качания кристаллизатора [2]. Помимо того, что данный механизм практически исключает вероятность возникновения недопустимых осевых биений кристаллизатора и обладает высокой надежностью, он еще позволяет изменять амплитуду, частоту и закон колебаний. Указанные достоинства дают возможность гибко и оперативно реагировать на изменение скорости разливки.

Для повышения стабильности разливки и исключения субъективного фактора воздействия на ход процесса и качество продукции целесообразно оснащать МНЛЗ системами автоматической подачи ШОС в кристаллизатор [3]. При использовании качественной смеси это обеспечит уменьшение усилия вытягивания за счет снижения сил трения и равномерные условия охлаждения поверхности заготовки по всему периметру.

С целью выравнивания температурного поля по сечению слитка и его затвердевающей корочки необходимо применять динамические методы воздействия на жидкое ядро. Наиболее распространенным решением в данной области является электромагнитное перемешивание [4, 5]. Чтобы избежать возмущения зеркала металла и затягивания в расплав частиц шлака, некоторые производители предлагают установку двух катушек по высоте кристаллизатора: первая «успокаивает» металл в районе зеркала, а вторая, расположенная ниже, осуществляет перемешивание расплава [6].

В процессе наших исследований были проведены расчетные эксперименты с целью определения степени воздействия перемешивания на процессы кристаллизации и напряженно-деформированное состояние непрерывнолитых заготовок [7, 8]. В результате было установлено, что благодаря использованию данного метода сокращается время снятия перегрева расплава и уменьшается температурный градиент в затвердевшей корочке, что, в свою очередь, способствует снижению уровня термонапряжений и деформаций. Кроме того, как показывает производственный опыт, перемешивание в зоне кристаллизатора МНЛЗ способствует уменьшению толщины зоны столбчатых кристаллов, улучшает условия для выделения неметаллических включений.

Согласно данным производителей металлургического оборудования, одним из наиболее действенных способов повышения скорости разливки и улучшения качества поверхности непрерывнолитых заготовок является совершенствование

геометрии кристаллизаторов (например, кристаллизатор с параболической конусностью) [9]. Делается это с целью компенсации усадки металла при затвердевании и охлаждении. Применение кристаллизаторов современной конструкции обеспечивает более стабильные условия охлаждения поверхности слитка по длине кристаллизатора и позволяет получить на выходе корочку большей толщины.

Вместе с тем, только совершенствование конструкции кристаллизатора и применение перечисленных способов и устройств не может гарантировать получение качественной заготовки на МНЛЗ. Учитывая, что в момент возникновения газового зазора в кристаллизаторе наблюдается скачок термонапряжений и деформаций, целесообразно контролировать данный процесс. Для этого, а также с целью управления интенсивностью охлаждения заготовки в кристаллизаторе и определения рациональной скорости разливки при изменении марки стали или размеров разливаемой заготовки (например, как на МНЛЗ-3 РУП «БМЗ») необходимо иметь информацию о состоянии затвердевающей корочки.

Очевидно, что оценить толщину затвердевшей корочки в какой-либо момент времени можно лишь расчетным путем. Но существуют еще и косвенные показатели, свидетельствующие о том, что толщина затвердевшего металла достигла значения, которого достаточно, чтобы корочка выдержала ферростатическое давление расплава на выходе из кристаллизатора и исключить вспучивание заготовки или прорыв расплава. Это так называемая «связь уровня». Как показали исследования [10], на расстоянии около 0,45–0,5 м от зеркала расплава значение «связи» резко уменьшается и в конце кристаллизатора не превышает 0,1–0,12. Вмонтировав в стенки кристаллизатора электроконтакты на расстоянии 0,5 м от зеркала расплава и в конце кристаллизатора, мы получим возможность контролировать данный параметр и, тем самым, определять, достаточна ли толщина затвердевшей корочки, стабильно ли работает система охлаждения кристаллизатора и симметричны ли условия охлаждения.

Кроме того, на основании полученной информации представляется возможным определить рациональную скорость разливки заготовки в зависимости от марки стали и размеров сечения: если значение «связи уровня» на расстоянии 0,5 м от зеркала металла находится в пределах 0,45–0,50, а в конце кристаллизатора не превышает 0,12, значит, скорость выбрана верно, если меньше, скорость можно увеличить и наоборот. Резкое увели-

чение «связи уровня» при постоянной скорости разливки и интенсивности охлаждения свидетельствует о том, что нарушен режим подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор либо возникли проблемы в системе охлаждения.

Таким образом, применение предлагаемого метода в условиях действующего производства позволит эффективно контролировать процесс затвердевания заготовки в кристаллизаторе, т. е. на протяжении наиболее важной стадии технологического процесса непрерывной разливки, а также даст возможность определять рациональные режимы охлаждения и скорость разливки при изменении марочного и размерного сортамента. Следует отметить, что такая система довольно просто агрегируется в состав действующих систем АСУ ТП, что, в конечном итоге, может стать действенным инструментом для управления интенсивностью охлаждения кристаллизатора и скоростью вытягивания слитка.

Совершенствование конструкции разливочной дуги МНЛЗ и режимов охлаждения заготовок в ЗВО. Как было сказано выше, интенсивность охлаждения металла в кристаллизаторе должна быть достаточной для того, чтобы на выходе затвердевшая корочка могла выдерживать возникающие в ней термонапряжения, ферростатическое давление жидкой стали, усилие вытягивания и механическое воздействие со стороны роликов. Как показал анализ расчетов, резкое возрастание интенсивности охлаждения поверхности заготовки в первой секции ЗВО вызывает скачок термонапряжений и деформаций в металле (рис. 1). А если учесть, что именно в начале ЗВО на радиальных и криволинейных МНЛЗ, как правило, осуществляется изгиб слитка, то становится очевидным, что именно на этом этапе создаются предпосылки для возникновения дефектов в литой стали. Это подтверждают результаты анализа макроструктуры непрерывнолитых заготовок: глубина расположения ликвационных полосок свидетельствует о том, что они образуются именно в первой секции ЗВО. И отчасти данные проблемы вызваны не только интенсивным охлаждением, но и значительными механическими нагрузками на заготовку со стороны роликов.

В настоящее время ряд производителей металлургического оборудования (Фест-Альпине, Италимплянти и др., SMS Demag) предлагают новые технические решения в области строительства МНЛЗ. Особое внимание в данных конструкциях уделяется вопросу воздействия роликов разливочной дуги на поверхность затвердевающей заготовки. Очевидно, что наиболее проблемные

зоны с точки зрения вероятности возникновения дефектов – это участки изгиба и разгиба заготовки. С целью снижения механического воздействия со стороны роликов предлагается контролировать давление на затвердевающую корочку, изготавливать дугу из связанных между собой самоцентрирующихся секций (по принципу автопоезда с прицепами) и др. [11].

При выполнении исследований в области непрерывной разливки стали специалистами БНТУ был предложен альтернативный вариант, который предполагает автоматическое поддержание давления со стороны роликов на заготовку на заданном уровне. При этом в качестве основополагающего используется принцип работы систем подрессоривания автотракторной техники, реализованной учеными БНТУ на ряде белорусских предприятий [12]. Данная система обеспечит оптимальный режим разливки заготовок в условиях МНЛЗ при различных режимах. Конструктивно система может быть реализована на стандартных, применяемых в машиностроении узлах. В соответствии с рассмотренным предложением подготовлена и подана заявка на изобретение.

Кроме механического воздействия со стороны роликов, на поверхность заготовки непосредственное влияние на уровень термонапряжений и деформаций металла в ЗВО оказывают режимы охлаждения. Из теории непрерывной разливки известно, что они должны удовлетворять двум условиям: обеспечивать отвод теплоты, выделяющейся при затвердевании стали без разогрева поверхности заготовки; интенсивность охлаждения должна быть достаточна для того, чтобы в осевой области слитка к моменту разгиба не было жидкого металла, но при этом температура на поверхности заготовки находилась в диапазоне пластичности (от 850 до 1100 °С).

Как показал анализ результатов исследований, излишняя интенсивность охлаждения металла в ЗВО может вызвать образование дефектов в виде наружных и внутренних трещин, а также развитие дефектов, возникших в кристаллизаторе. В связи с этим рекомендации, изложенные ниже, касаются как режимов охлаждения металла, так и некоторых конструктивных элементов ЗВО.

В технической литературе [13, 14] с целью получения высококачественной продукции при непрерывном литье рекомендуется организовывать так называемые «мягкие» режимы охлаждения. Решение данной задачи возможно путем использования систем водо-воздушного охлаждения, а также за счет удлинения ЗВО, т. е. увеличения

продолжительности охлаждения металла при снижении локальной интенсивности. При этом для понижения уровня термонапряжений в затвердевающей корочке заготовки необходимо не только уменьшать локальную интенсивность теплоотвода, но и рационально распределять расход охладителя по периметру заготовки. Если при разливке заготовок круглого сечения следует обеспечивать равномерное температурное поле на поверхности, то при получении заготовок квадратного и прямоугольного сечения при одинаковой интенсивности теплообмена по всему периметру возникает проблема переохлаждения угловых зон, что может приводить к росту термонапряжений и образованию трещин.

В связи с этим при разливке на одной МНЛЗ заготовок разного сечения (например, МНЛЗ-3 РУП «БМЗ») следует использовать форсунки с изменяемым углом распыла (факела) либо изменять расстояние от форсунки до охлаждаемой поверхности, а на машинах, где формат разливки постоянен, – применять форсунки, обеспечивающие подачу основного объема охладителя на среднюю часть грани.

Выбор интенсивности охлаждения на стадии разработки технологии следует осуществлять с использованием математических моделей, адекватно описывающих исследуемый процесс, а также на основании теплового состояния поверхности заготовки на выходе из ЗВО. Наиболее перспективным способом контроля, на наш взгляд, представляется использование тепловизионных систем, которые дают информацию о температуре поверхности всей заготовки на выходе из ЗВО. Включение таких приборов в состав АСУ ТП позволит оперативно изменять как интенсивность охлаждения на различных гранях заготовки с целью получения требуемого результата (равномерности температурного поля и попадание в диапазон пластичности), так и изменять в случае необходимости угол распыла или расстояние от форсунки до поверхности заготовки. Кроме того, визуализация данных, получаемых от тепловизоров, позволит оператору контролировать работу системы ЗВО.

С точки зрения повышения производительности оборудования увеличение интенсивности охлаждения заготовок в ЗВО не является эффективным инструментом: чем больше сечение разливаемой заготовки, тем меньше влияние интенсивности охлаждения на металлургическую длину слитка. Это подтверждается как производственными данными, так и результатами наших исследований [7].

Способы улучшения качества осевой зоны непрерывнолитых заготовок и повышения производительности оборудования. Как было отмечено выше, на оси заготовки после завершения кристаллизации металла наблюдается резкий скачок деформаций, который происходит с одновременным появлением и достаточно быстрым ростом растягивающих напряжений (рис. 1). Следовательно, применение в период завершения процесса кристаллизации «жестких» режимов охлаждения, как это рекомендовано в работе [7], нецелесообразно, так как может лишь повысить величину напряжений и деформаций. Наиболее простым способом решения данной проблемы является установка над поверхностью заготовки в зумпфовой зоне защитных экранов, что позволит практически в 2 раза уменьшить интенсивность теплоотвода от поверхности заготовки.

Но при необходимости увеличения скорости разливки более эффективно применение различных способов внешнего воздействия на процесс кристаллизации стали. Вопросы использования одного из способов динамического воздействия на процесс непрерывного литья заготовок – электромагнитного перемешивания – частично были рассмотрены нами ранее при анализе процессов, протекающих в кристаллизаторе. Следует отметить, что электромагнитное перемешивание может также использоваться не только на начальной стадии формирования структуры заготовки (т. е. в кристаллизаторе или на выходе из него). Но по мере утолщения корочки значительно растут энергозатраты на осуществление данной операции. В связи с этим на поздних стадиях затвердевания непрерывнолитой заготовки более перспективным следует признать метод «мягкого» обжатия. За счет незначительной деформации заготовки (до 3%) компенсируется усадка сердцевины, создаются восходящие потоки расплава в жидком ядре. В результате снижаются уровень осевой пористости, балл ликвации, улучшается качество структуры осевой зоны, уменьшается металлургическая длина слитка.

Но использование принципа «мягкого» обжатия требует точного знания глубины жидкой лунки и благодаря механическому воздействию на затвердевающую корочку вызывает в ней рост напряжений и деформаций. Коллективом ученых БНТУ были предложены новые технические решения по вопросу реализации рассматриваемой технологии и получены патенты РБ [15]. Суть предложения заключается в том, что с целью снижения термонапряжений в затвердевающей корочке и уменьшения усилия обжатия на разливоч-

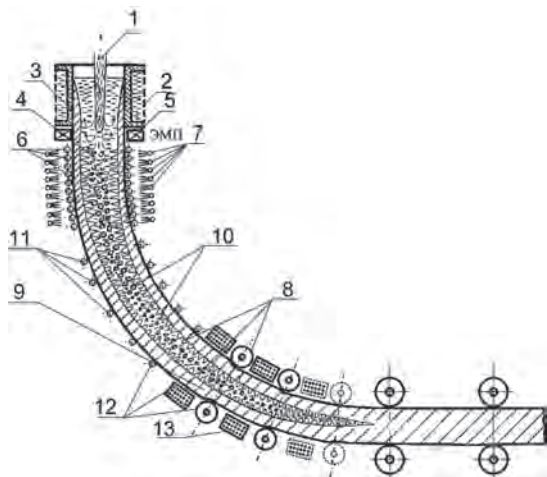


Рис. 2. Схема МНЛЗ системой многостадийного мягкого обжатия и подогрева в зумпфовой зоне: 1 – расплав; 2 – рубашка охлаждения кристаллизатора; 3 – затвердевшая корочка; 4 – жидкая сердцевина заготовки; 5 – катушки электромагнитного перемешивания; 6 – первая секция опорных роликов; 7 – водяные форсунки зоны вторичного охлаждения; 8 – дендриты; 9 – зона деформации; 10 – скопления ликватов и неметаллических включений в жидком ядре; 11 – опорные ролики разливочной дуги; 12 – тянущее-деформирующая роликсовая клетка; 13 – индукционный нагреватель

ной дуге перед обжимной клетью предлагается устанавливать индукционный подогреватель. В случае последовательной установки нескольких таких секций (подогреватель–обжимная клетка) представляется возможным увеличить степень обжатия и, тем самым, существенно улучшить

структуру литой заготовки и приблизить ее качество к уровню катаного металла (рис. 2).

Весьма перспективным с точки зрения улучшения качества литого металла и повышения скорости разливки, как показали наши исследования [16], является способ введения в затвердевающий металл микрохолодильников и модификаторов. Влияние микрохолодильников (инокуляторов) и модификаторов на изменение макроструктуры слитков заключается в создании дополнительных центров кристаллизации в жидкой фазе слитка. Причем образование зародышей равноосных кристаллов может произойти за зоной концентрационного переохлаждения, где металл чище. В качестве модификаторов успешно применяют РЗМ. Данный метод позволяет существенно ускорить процесс кристаллизации металла и уменьшить уровень осевой ликвации.

Выводы

На основании изложенного выше необходимо отметить, что технология и оборудование непрерывной разливки стали постоянно совершенствуются и весьма важную роль в этом процессе играют теоретические исследования. Результаты математического моделирования позволяют выявить наиболее «слабые» звенья процесса и, тем самым, определить направления работы в области конструирования МНЛЗ и совершенствования существующих технологий.

Литература

1. Термонапряженное состояние заготовок при непрерывном литье. Ч. 1. Расчеты термических напряжений в сортовой заготовке из легированных марок сталей / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, С. М. Кабишов, А. П. Фоменко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 1. С. 11–18.
2. Улучшение качества и повышение экономичности технологии непрерывного литья заготовок / П. Мюллер, Г. Грундман, Х. фон Выл и др. // Черные металлы. 2003. № 2. С. 44–48.
3. Ногтев В. П., Юречко Д. В., Сатосин М. В. Сопоставление эффективности шлакообразующих смесей путем измерения силы трения в кристаллизаторе // Сталь. 1999. № 11. С. 25–26.
4. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Несенчук А. П., Фоменко А. П. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 1. Управление кристаллической структурой / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2000.
5. Смирнов А. А. Применение электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали // Сталь. 1995. № 8. С. 31–32.
6. Бейтельман Л. Улучшение качества сортовых заготовок путем электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе // Сталь. 1997. № 4. С. 21–24.
7. Теоретический анализ влияния технологических факторов на процесс затвердевания стальных заготовок при непрерывном литье / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, С. М. Кабишов // Бюл. науч.-техн. и эконом. информ. «Черная металлургия». 2008. Вып. 4. С. 66–73.
8. Снижение химической неоднородности стальных слитков под влиянием электрического тока / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова, С. М. Кабишов // Республ. межвед. сб. науч. тр. «Металлургия». Мн.: Выш. шк., 2008. Вып. 31. С. 30–40.
9. Хорбах У., Коккентид Й., Юнг В. Скоростное литье сортовых заготовок через кристаллизаторы с параболической конусностью // Черные металлы. 1998. № 5. С. 19–25.
10. Рудой Л. С., Майоров Н. П., Кушнарев И. Т. Контакт слитка со стенками кристаллизатора // Сталь. 1966. № 12. С. 93–95.
11. Улучшение качества и повышение экономичности технологии непрерывного литья заготовок / П. Мюллер, Г. Грундман, Х. фон Выл и др. // Черные металлы. 2003. № 2. С. 44–48.

12. Пат. РБ № 5182. Способ Фурунжиева управления движением транспортных средств.
13. Усовершенствование конструкции коллектора в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / К. Н. Вдовин, А. Д. Носов, С. В. Горосткин и др. // Сталь. 1999. № 11. С. 24–25.
14. Оптимизация режимов вторичного охлаждения непрерывнолитых слябов / А. А. Смирнов, В. М. Паршин, Е. П. Парфенов и др. // Сталь. 1995. № 12. С. 30–31.
15. Пат. РБ № U3385. Машина непрерывной разливки стали.
16. Тимошпольский В. И., Самойлович Ю. А., Кабишов С. М. Сокращение зоны столбчатых кристаллов в стальном слитке путем микролегирования расплава // Литье и металлургия. 2007. № 3. С. 42–49.