



Е.И.Марукович, В.А.Маточкин

ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ

УДК 669.14.046.5

Марукович, Е. И. Производство высокоуглеродистой катанки / Е. И. Марукович, В. А. Маточкин ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т технологии металлов. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с. – ISBN 978-985-08-2542-7.

В монографии описаны процессы выплавки стали в дуговых печах, непрерывной разливки и прокатки заготовок и катанки. Приведены математические модели упругопластических деформаций, термических и механических напряжений при кристаллизации и охлаждении непрерывнолитых заготовок. Показано влияние скорости вытяжки, температуры разливки, диаметра заготовок, интенсивности теплоотдачи на формирование твердой корки в кристаллизаторе при изготовлении заготовок различных размеров из углеродистых и легированных сталей.

Рекомендована для инженерно-технических работников металлургических предприятий, сотрудников НИИ, а также может быть полезна студентам, магистрантам и аспирантам соответствующих специальностей.

Табл. 4. Ил. 89. Библиогр.: 235 назв.

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, доктор технических наук А. П. Ласковнев
академик НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор А. И. Гордиенко

ISBN 978-985-08-2542-7

© Марукович Е. И., Маточкин В. А., 2020
© Оформление. РУП «Издательский дом
«Беларуская навука», 2020

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние два десятилетия в мировой практике развития черной металлургии наметилась тенденция строительства мини-заводов с относительно небольшим годовым выпуском металлопродукции – до 2,0 млн т.

Концепция металлургических мини-заводов получила развитие благодаря прогрессу в области сталеплавильного производства, технологии внепечной обработки стали, созданию высокопроизводительных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и прокатных станов.

В настоящее время выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) считается самым передовым методом производства стали. За последние 10 лет средняя масса металла, выплавляемая в ДСП за плавку, увеличилась от 100 до 150 т, а продолжительность плавки сократилась до 70 мин [122]. Основные усилия при совершенствовании технологии выплавки стали в ДСП направлены на повышение производительности плавильного агрегата и снижение себестоимости 1 т жидкой стали за счет увеличения расхода кислорода во время плавки до 30–40 м³/т, использования более мощных и длинных дуг, тепла отходящих газов для подогрева подаваемого в ДСП металлолома, применения конструкции сдвоенной электродуговой печи с одним или двумя комплектами электродов, внедрения в производство конструктивных решений по донному сливу металла, обеспечивающих быстрый бесшлаковый выпуск плавки, а также использования комбинации продувки жидкой ванны кислородом и углеродом.

Ужесточение конкуренции на рынке металлопродукции стимулировало создание эффективных технологий по внепечной обработке и непрерывной разливке стали. Широкое внедрение их и машин непрерывной разливки стали происходило в Японии, США, Западной Европе, СССР и других странах. Этому способствовал экономический рост в промышленно развитых странах мира. Именно в этот период произошла трансформация конструкций МНЛЗ из вертикальных в радиальные, а затем – в криволинейные с прогрессирующим разгибом, что позволило существенно снизить затраты на строительство таких машин и уменьшить срок их окупаемости. Доля непрерывной разливки в общем объеме производства стальных заготовок ведущих мировых производителей составляет: Япония – 97 %, страны Европейского союза – 96 %, США – 94 %, Бразилия – 74 %, Китай – 55 %, Россия – 50 %. Успешно работают примерно 1750 МНЛЗ более чем в 90 странах мира. Разливка стали в изложницы практически исчезла в структурах металлургического производства ведущих металлургических стран мира уже 15–20 лет назад.

Обычно в состав оборудования для внепечной обработки входят установка ковш-печь и вакууматор. Основной задачей внепечной обработки является достижение необходимой чистоты металла. Ковш-печь является связующим элементом между электродуговой печью и МНЛЗ, в котором осуществляется комплекс мероприятий по доводке стали по температуре и химическому составу, ее рафинированию, а также выдержке во времени в соответствии с режимом разливки на МНЛЗ. Ковш-печь обеспечивает расширение функциональных возможностей внепечной обработки, стабилизацию работы МНЛЗ, энерго- и ресурсосберегающий эффект.

Современный мини-завод состоит из дуговой сталеплавильной печи, установки ковш-печь, высокопроизводительной МНЛЗ и группы современных прокатных станов. Мини-заводы имеют следующие преимущества по сравнению с металлургическим комбинатом с полным металлургическим циклом [74, 76]:

- малые сроки проектирования и строительства и ориентация на минимальный срок окупаемости;

- небольшие площади для размещения оборудования, которые в 8–10 раз меньше, чем для традиционных металлургических комбинатов;
- низкая стоимость мини-завода (капитальные вложения); 1 т готовой продукции в год оценивается на уровне 150–300 долл. США, в то время как для традиционного завода с полным циклом – 650–1000 долл. США;
- реконструкции агрегатов с целью повышения эффективности производства (затраты на модернизацию традиционного комбината с полным циклом оцениваются на уровне 100–200 долл. США на 1 т стали годового производства, а мини-завода с ДСП – 50 долл. США на 1 т);
- согласование работы агрегатов в широком диапазоне годовой производительности;
- производство небольших партий проката в зависимости от нужд потребителей на внутреннем и внешнем рынке;
- высокое качество стали и готового проката;
- рациональное использование энергоресурсов и способность перерабатывать железосодержащие отходы;
- минимальные выбросы технологических отходов в окружающую среду.

В настоящее время в мире насчитывается около 600 мини-заводов, на которых производится 60 % мирового объема стали. Стратегическое направление развития металлургии – это расширение применения мини-заводов высшего технического уровня в составе ДСП, установки ковш-печь, МНЛЗ и непрерывных прокатных станков.

Исходным продуктом для производства проволоки различного назначения является катанка. Несмотря на современный уровень проектной технологии, потребовалось дальнейшее ее совершенствование с целью увеличения производительности металлургических агрегатов, улучшения качества и расширения марочного и размерного сортамента производимой катанки. Эти вопросы стали особенно актуальными после распада СССР и нарушения производственных связей между бывшими республиками.

Так как качество катанки определяется на всех металлургических переделах: начиная от подготовки лома, выплавки стали в электродуговых печах и заканчивая термообработкой готовой катанки в потоке прокатного стана, – потребовались разработка теоретических основ сквозной технологии производства высококачественной катанки, проведение экспериментальных исследований на всех переделах, разработка и реализация реконструктивных мероприятий по модернизации действующих металлургических агрегатов и новых решений по совершенствованию технологии.

Учитывая уже накопленный опыт других исследователей в области выплавки стали в электродуговых печах, непрерывной разливки, нагрева и прокатки непрерывнолитых заготовок на обжимных реверсивных и высокоскоростных станах, авторами монографии за основу принята методология комплексных расчетно-экспериментальных исследований. Решались задачи повышения чистоты стали и снижения энергозатрат при ее выплавке в ДСП, теоретического и экспериментального обоснования рациональных режимов затвердевания, охлаждения и нагрева заготовок применительно к производству катанки на современных станах. Учет взаимосвязи режимов кристаллизации, охлаждения, нагрева заготовок и последующей их температурно-деформационной обработки особенно важен при увеличении производительности действующих агрегатов современного мини-завода, освоении производства непрерывнолитых заготовок увеличенного сечения, а также при отливке и прокатке заготовок из высоколегированных марок сталей и сплавов [73, 218].

При исследовании формирования непрерывнолитых заготовок следует учитывать такие основополагающие факторы, как, например, температурное поле в рамках теории глобулярной (объемной) кристаллизации, взаимосвязанность задач теплофизики и термомеханики, когда одновременно исследуются закономерности распределения температур и напряжений в твердой оболочке (корочке) твердеющей заготовки, а также процессов, влияющих на динамику нагрева с точки зрения качества непрерывнолитого металла (образования дефектов в виде горячих

трещин), что важно для оценки возможности увеличения производительности нагревательных устройств, расположенных в линиях прокатных станов.

Особенностью современных мини-заводов является использование высокопроизводительных прокатных станов. При производстве катанки применяют высокоскоростные проволочные, мелкосортно-проволочные и сортопроволочные станы с проектной скоростью прокатки до 100–120 м/с. В состав технологического оборудования таких станов входят нагревательные печи с механизированным подом, непрерывные черновые и промежуточные группы клетей, десятиклетьевые чистовые блоки и линии двухстадийного охлаждения катанки типа Stelmor. На основании анализа мировых тенденций развития технологии производства катанки [72] авторами настоящего исследования определены следующие основные направления дальнейшего развития проволочных и мелкосортно-проволочных станов: повышение фактической скорости прокатки катанки до 120–150 м/с; увеличение массы мотков до 2,5 т и более; улучшение структуры и механических свойств, равномерности распределения механических свойств по длине мотков и в плавке; повышение точности катанки; расширение марочного и размерного сортамента продукции.

Как показал опыт эксплуатации зарубежных высокоскоростных станов, проектные скорости прокатки 100 м/с и более, как правило, не достигаются, фактические скорости обычно меньше проектных. Это объясняется тем, что при проектировании станов и выборе параметров оборудования и режимов его работы не учитываются особенности процесса высокоскоростной прокатки, что в итоге приводит к нарушению стабильности работы высокоскоростного оборудования – чистовых блоков и виткообразователей, увеличению числа аварийных остановок стана, повышению расхода металла и т. д.

Ведущими мировыми фирмами – изготовителями оборудования современных прокатных станов, входящих в состав мини-заводов, ведется интенсивный поиск решений по компоновке и составу оборудования для осуществления процесса прокатки

со скоростями до 150 м/с. При этом ставится задача обеспечения стабильности процесса и формирования структуры металла на выходе из стана, что позволит снизить затраты при дальнейшей переработке катанки широкого марочного сортамента и различного назначения в сталепроволочном производстве.

Исследования авторов настоящей монографии в области технологии производства катанки посвящены анализу и количественной оценке влияния параметров высокоскоростной деформации на формирование структуры и свойств, что может явиться основой для дальнейшего развития способов и технологий в области горячего деформирования на высокоскоростных проволочных станах [72, 231]. При этом основное внимание уделяется математическому моделированию процессов высокоскоростной обработки металлов давлением с учетом формирования исходной структуры перед линией термообработки, расположенной в потоке проволочного стана. Данный подход в последнее время приобретает все большее значение, поскольку появляется возможность регулирования и управления процессом температурно-деформационной обработки с целью улучшения качества катанки, повышения скорости прокатки и производительности стана. Благодаря моделированию можно по различным критериям оптимизировать отдельные технологические этапы и процесс в целом.

Основные разработки в области улучшения структуры и свойств катанки направлены на организацию на высокоскоростных проволочных станах процессов нормализующей прокатки и термомеханической обработки (ТМО), которые доказали свою эффективность и применяются на мелкосортных и сортовых станах, работающих с относительно невысокими скоростями прокатки. Для реализации этих процессов необходимо иметь возможность управления температурой конца прокатки в диапазоне 750–1000 °С, что на высокоскоростных непрерывных станах проблематично вследствие интенсивного разогрева металла за счет выделения тепла, которое происходит в процессе деформации в клетях стана и особенно в чистовых блоках. Также при прокатке в существующих чистовых блоках, применяемых на

всех высокоскоростных станах мира, невозможно получить катанку всего размерного сортамента с допусками менее $\pm 0,15$.

В настоящее время мировое производство катанки превышает 50 млн т в год, что составляет 10 % от общего выпуска проката. Катанка является исходным материалом для метизной промышленности, из нее изготавливают проволоку самого различного назначения – для производства канатов, металлокорда, пружин, сварочных электродов, крепежных изделий и др. В связи с быстрыми темпами модернизации метизной промышленности, что связано с развитием потребляющих отраслей, и в первую очередь машиностроения, ужесточаются требования к качеству заготовок, произведенных посредством горячей прокатки. В мире наблюдается тенденция увеличения выпуска катанки ответственного назначения для получения высокопрочного металлокорда, пружин и крепежных изделий из высоколегированных сталей, особо коррозионностойкой проволоки для работы в агрессивных средах, арматурной проволоки с повышенной прочностью и низкими релаксационными свойствами.

На основании анализа технологии производства катанки на всех переделах ряд важнейших технологических задач, определяющих производительность агрегатов заводов, качество катанки и конечной проволоки (металлокорд, бортовая и канатная проволока, проволока для армирования рукавов высокого давления и др.), требуют дальнейшей теоретической проработки, экспериментального исследования и разработки новых технологических решений и оборудования для их решения.

Анализ результатов исследований технологии производства высококачественной катанки на современных мини-заводах показал, что недостаточно изучены проблемы повышения чистоты стали, выплавляемой в ДСП, и снижения энергозатрат на ее производство; причины образования поверхностных и горячих трещин в ходе непрерывного литья, разрушения металла в процессе нагрева холодного металла в нагревательных печах прокатных станов, что снижает выход годного металлопроката. Не во всех случаях удается добиться синхронизации процесса

«разливка – нагрев – прокатка» вследствие возникновения внутренних и внешних дефектов в непрерывнолитых заготовках, что увеличивает энергозатраты на производство проката и снижает выход годного.

Актуальными остаются вопросы разработки эффективной энерго- и ресурсосберегающей теплотехнологии затвердевания, охлаждения и нагрева сортовых непрерывнолитых заготовок. Это требует комплексного подхода, включая математическое моделирование термонапряженного состояния стального слитка и разработку методики расчета температур, напряжений и деформаций в литых заготовках, в том числе крупного поперечного сечения из высокоуглеродистых и легированных марок сталей.

Установлено, что, несмотря на высокую технологичность и эксплуатационную надежность действующих агрегатов по производству непрерывнолитых заготовок, имеются резервы для повышения производительности, и прежде всего по увеличению скорости разливки заготовок, а также резервы и при синхронизации совмещенного теплотехнологического процесса «затвердевание – охлаждение – нагрев» для различных сечений литой заготовки и марок сталей, включая высоколегированные стали и сплавы, что должно повлечь снижение энергозатрат по переделам.

С помощью математического моделирования авторами установлены основные закономерности распределения температурного поля по сечению раската и параметров деформации вдоль линии стана от различных факторов, определены рациональные регулирующие воздействия на процесс высокоскоростной деформации, обеспечивающие стабильность процесса, высокую производительность стана и повышение качества катанки.

Учитывая изложенное, в настоящей работе была решена важная для Республики Беларусь задача – разработаны теоретические основы и освоена комплексная технология производства высококачественной катанки широкого сортамента на современном мини-заводе, начиная от подготовки лома, выплавки стали и заканчивая прокаткой и термообработкой готового проката.

Авторами раскрыта физическая сущность процессов и явлений, установлены и обобщены особенности и закономерности влияния процессов выплавки стали в ДСП, непрерывной разливки, нагрева и прокатки непрерывнолитых заготовок на обжимном и проволочном станах и термообработки готового проката на качество продукции и эффективность комплексной технологии производства высококачественной катанки, что в совокупности вносит значительный вклад в развитие электрометаллургии, высокоскоростной прокатки как составной части науки о металлургии черных, цветных и редких металлов и обработке металлов давлением.

Большое практическое значение для получения максимально чистого сплава имеет разработка нового подхода к описанию процесса удаления неметаллических включений при внепечной обработке стали с учетом гидродинамики металлического расплава и физико-химических процессов на границе раздела фаз «расплав – шлак», послужившего основой для разработки путей управления процессом удаления неметаллических включений в ходе обработки на установке ковш-печь за счет изменения интенсивности продувки инертным газом, типа сопла, продолжительности продувки и регулирования состава шлака, что позволило свести до минимума количество неметаллических включений в расплаве. Экспериментальные данные, полученные авторами по изучению равновесия оксидов примесных элементов, дают возможность оценивать качество стали в различные промежутки времени и вносить соответствующие изменения в количественный состав шихтовых материалов.

Разработанные статистическая модель и алгоритм расчета сокращенного материального баланса при производстве жидкого полупродукта в ДСП позволяют надежно определять массу жидкого металла в ковше после выпуска из печи, остаток металла в печи от предыдущей плавки, коэффициенты выхода металла, шлака, металлической пыли и нормы расхода материалов при выплавке на 1 т используемой металлической шихты, что дает возможность оценить технологическую и энергетическую эффективность плавки и снизить ее себестоимость.

Большое практическое значение имеют результаты экспериментальных и теоретических исследований по изучению закономерностей процессов затвердевания и охлаждения заготовок из низко- и среднеуглеродистых сталей. Это позволяет увеличить скорость разливки на МНЛЗ от 2,3–2,4 до 2,6–2,8 м/мин, усовершенствовать режимы разливки из высокоуглеродистых и легированных сталей, а в результате поднять производительность на 5–7 %.

Результаты исследований, изложенных в монографии, внедрены на Белорусском металлургическом заводе.

**ВЫПЛАВКА СТАЛИ В ДУГОВЫХ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ,
НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА И ПРОКАТКА КАТАНКИ**

**1.1. Краткая характеристика технологии
производства катанки**

В 80-е годы XX века во всем мире началась модернизация металлургического производства. Важнейшим направлением развития металлургии явилось возведение мини-заводов с полным металлургическим циклом. Вместо комплексов «кислородный конвертор – МНЛЗ – прокатный стан» началось строительство более совершенных комплексов «дуговая сталеплавильная печь – установка ковш-печь – вакууматор – МНЛЗ – высокопроизводительные прокатные станы».

Рассмотрим выплавку стали в сверхмощных 100-тонных дуговых печах с мощностью трансформаторов 95 МВА.

Углеродистые и низколегированные стали производят по схеме ДСП – установка ковш-печь – МНЛЗ. В свою очередь высококачественную углеродистую и высоколегированную сталь – по схеме ДСП – установка ковш-печь – вакууматор циркуляционный (ковшевой) – МНЛЗ с радиусом изгиба 10 м.

При эксплуатации печей чередуются два метода выплавки стали: с завалкой шихты на «сухую» подину – одна или более плавов, и с завалкой шихты на «болото» (на шлак и примерно 1/15 часть массы металла от предыдущей плавки) – 2–12 плавов. Основная технология – одношлаковый процесс с завалкой шихты на «болото», при этом достигается максимальная производительность дуговой печи. Плавка с использованием остатка расплава от предыдущей плавки позволяет закрыть подину, защитив ее от пережога мощными дугами, и дает возможность в течение 1–2 мин выйти на предельную мощность. Оставленный шлак облегчает шлакообразование, способствуя устойчивому

горению дуг, обеспечивается эффективная подача кислорода с момента начала плавки [155].

На ДСП используется технология донной продувки ванны инертным газом с перспективным развитием совмещенного процесса с глубинной подачей кислорода через боковые фурмы, рабочее окно печи, что повышает производительность и улучшает качественные показатели стали.

Эффективной мерой повышения качества высокоуглеродистых и легированных сталей является внепечная обработка стали на вакууматорах. В состав отделения внепечной обработки стали входят циркуляционный (RH) и ковшевой (VD) вакууматоры, а также установка ковш-печь. Основной задачей вакуумирования является максимальное удаление газов из стали. Дегазации подвергаются высокоуглеродистые и легированные стали [12]. Удаление растворенных газов из расплава происходит по механизмам, описанным в [13]. При определенных условиях применяется внепечная обработка стали силикокальцием СК-40 [12, 184]. Также разработана и используется технология внепечной обработки стали порошковыми проволоками [76].

В настоящее время на металлургических заводах применяются различные схемы и конструкции МНЛЗ [18, 38, 74, 145]. Количество МНЛЗ в мире превышает 2000 установок с превалирующим числом блюминговых машин [218].

Рассмотрим разливку углеродистых и низколегированных сталей на МНЛЗ в заготовку сечением $0,125 \times 0,125$ м, а также разливку высококачественных сталей ответственного назначения, в том числе кордовых и высоколегированных, на блюминговой МНЛЗ в сечение $0,25 \times 0,3$ м и $0,3 \times 0,4$ м.

Для разливки блюмов на Белорусском металлургическом заводе (БМЗ) установлена четырехручьева вертикального типа с прямолинейным кристаллизатором и последовательным изгибом и выпрямлением заготовок МНЛЗ. В упрощенном виде схема машины показана на рис 1.1. Диапазон скоростей – 0,1–0,8 м/мин, радиус дуги – 10 м.

На основании выполненных исследований влияния различных факторов на ликвацию углерода и чистоту поверхности не-

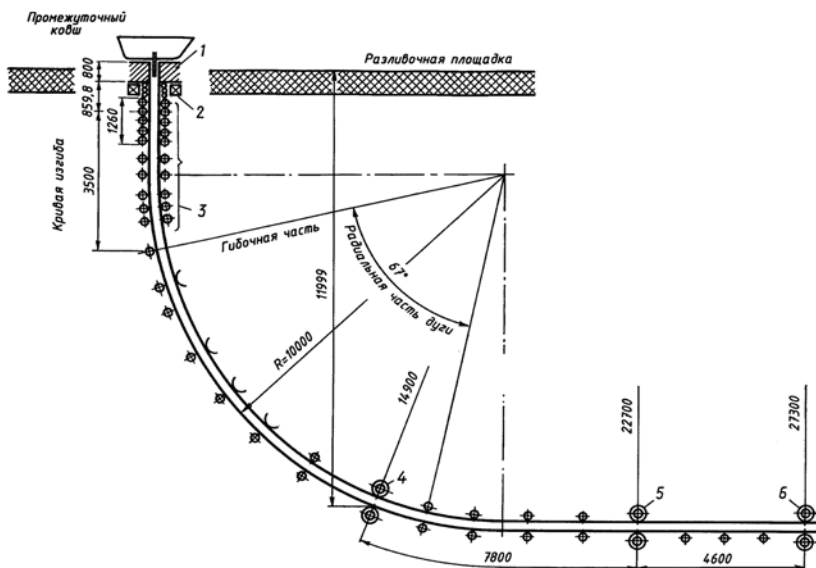


Рис. 1.1. Рабочая схема машины непрерывного литья заготовок № 3 Белорусского металлургического завода: 1 – медный кристаллизатор; 2 – устройство электромагнитного перемешивания; 3 – зона вторичного охлаждения; 4–6 – тянущие устройства (ТУ-1, ТУ-2, ТУ-3 соответственно)

прерывнолитых заготовок авторами данной монографии были определены оптимальные параметры разливки на МНЛЗ высокоуглеродистой стали и сформулированы основные направления реконструкции данной машины [74]. Было установлено, что повышение скорости разливки и температуры металла в промежуточном ковше увеличивает степень ликвации, поэтому рекомендовано скорость разливки поддерживать в интервале 0,5–0,8 м/с, температуру металла в промковше – на 20–30 °С выше температуры ликвидуса $t_{\text{лн}}$. Однако выполнение указанных рекомендаций не гарантировало уровень ликвации в катанке, соответствующей требованиям потребителей.

При реконструкции были реализованы следующие технические решения: удлинены кристаллизаторы и соответственно область первичного охлаждения на 100 мм, изменена конструкция

кристаллизаторов, установлены катушки электромагнитного перемешивания (ЭМП) в кристаллизаторах и в зумпфовой зоне; изменена конструкция секций зоны вторичного охлаждения; усовершенствована система автоматического регулирования (САР) уровня металла в кристаллизаторе; внедрена система автоматики 1-го и 2-го уровней нового поколения.

Для производства катанки ответственного назначения из высокоуглеродистых и легированных сталей используют непрерывнолитые заготовки (блюмы) сечением $0,25 \times 0,3$ м и $0,3 \times 0,4$ м, электросталеплавильного цеха. Заготовки прокатываются в сечение $0,125 \times 0,125$ м на обжимном стане 850 (рис. 1.2).

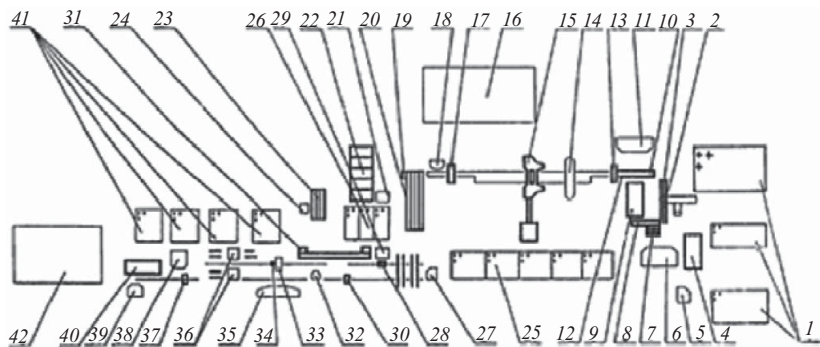


Рис. 1.2. Схема расположения основного технологического оборудования стана 850: 1 – склад блюмов ЭСПЦ-2, 2 – приемный ролик, 3 – загрузочная решетка с термостатом, 4 – подогревательная печь, 5 – ПУ-1а, 6 – ПУ-1, 7 – загрузочно-разгрузочное устройство, 8 – загрузочный ролик печи, 9 – нагревательная печь, 10 – ролик возврата, 11 – ПУ-2, 12 – ролик выдачи, 13 – гидросбив, 14 – ПУ-3, 15 – реверсивная клеть, 16 – участок ремонта технологического оборудования, 17 – пила горячей резки, 18 – ПУ-4, 19 – маркировочная машина, 20 – холодильник, 21 – ПУ-5, 22 – колодцы замедленного охлаждения, 23 – передаточный транспортер, 24 – ПУ-6, 25 – промежуточный склад, 26 – промежуточный склад 2, 27 – ПУ-8, 28 – правильная машина, 29 – ПУ-9, 30 – дробеструйная установка, 31 – установка магнитной дефектоскопии, 32 – ПУ-10, 33 – ПУ-11, 34 – установка ультразвукового контроля внутренних дефектов, 35 – ПУ-7, 36 – зачистные станки ПУ-12 и ПУ-13, 37 – пила холодной резки, 38 – ПУ-14, 39 – ПУ-15, 40 – вязальные машины, 41 – склад квадратных заготовок, 42 – склад готовой продукции

Нагрев заготовок до температуры горячего посада в нагревательную печь стана горячей прокатки ДУО-850 (далее – стан 850) производится в методической нагревательной печи с шагающими водоохлаждаемыми балками, с верхним и нижним подогревом и торцевой загрузкой и выдачей. После подогрева заготовки всех марок сталей транспортируются к нагревательной печи стана, к установке гидросбива окалины и далее – на стан 850. Стан имеет следующие технические характеристики: реверсивный с шестеренным приводом валков, станина закрытого типа; диаметр валков – 0,735–0,85 м и длина бочки – 2,2 м; мощность электродвигателя – 700 кВт.

Подготовка заготовок к прокатке в катанку производится на адьюстаже указанного типа стана и включает следующие операции: правка проката, удаление окалины на дробеструйной установке, контроль поверхностных и внутренних дефектов, зачистка поверхностных дефектов и порезка металла.

1.2. Совершенствование технологии выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах, непрерывной разливки и прокатки катанки

1.2.1. Выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах

В последние годы в мировой практике электросталеплавильного производства благодаря исследовательским работам металлургов и энергетиков разработана и реализована концепция использования дуговых печей сверхвысокой мощности, базирующаяся на применении трансформаторов мощностью 90–150 МВА [88, 96, 155]. Одновременно проведен комплекс мероприятий по улучшению конструкции печей, их электропитания и вспомогательного оборудования [208, 216], что совместно с использованием ковшевой металлургии позволило снизить продолжительность цикла плавки, уменьшить удельный расход электроэнергии и себестоимость стали, а также расширить марочный сортамент за счет высоколегированных марок стали.

Освоение проектной технологии выплавки стали (рассмотрим на примере Белорусского металлургического завода)

выявило ряд следующих недостатков: слишком высокая температура выпускаемого металла (1700–1740 °С); растянутость во времени плавки снижает производительность печей и серийность работы МНЛЗ и уменьшает выход качественного продукта; продолжительность межплавочных простоев из-за ремонта подины и заправки откосов; заложенная в проекте масса «болота» не является оптимальной и т. д.

Для разработки путей устранения недостатков проектной технологии был выполнен анализ большого количества плавов, на которых зарегистрирован локальный перегрев подины со значительным ее разрушением [15, 168]. Проведены также исследования по разработке направлений совершенствования технологии производства стали в ДСП с целью повышения качества стали и увеличения производительности электропечей, снижения энергозатрат на производство 1 т стали.

В результате установлено, что главным фактором, влияющим на перегрев подины и продолжительность плавки, является количество оставляемого «болота» в печи после выпуска металла.

Для определения рациональной массы «болота» было выполнено математическое моделирование динамики плавления шихты от основных технологических параметров в 100-тонной дуговой сталеплавильной печи БМЗ [167]. Установлено, что оптимальная масса «болота» равна 16,5 т. При данном показателе температура расплава позволяет совместить режимы выплавки и разливки, что снижает длительность выплавки стали от 120 мин по проекту до 80–90 мин.

На Белорусском металлургическом заводе была применена энерготехнологическая модель выплавки кордовых сталей [79, 168], рассмотрен энергетический баланс при выплавке стали в дуговой печи [80]. Рассчитана физико-химическая модель обезуглероживания металлической ванны переменной массы применительно к плавке в дуговой печи [177], учитывающая основные особенности процесса. Реализованы алгоритмы расчета процесса выплавки стали в ДСП с помощью АСУ ТП ДСП «Оракул», что обеспечило возможность ведения плавки в автоматическом режиме, улучшение технико-экономических показателей

работы печей, стабилизацию состава шлака, снижение расхода электроэнергии на 10–15 кВт·ч/т и продолжительности работы печи под током на 1,5–2,0 мин.

Использован способ раскисления и легирования стали пи-роуглеродом при сливе из расчета получения в металле 0,55 % углерода, после чего добавляется ферросилиций [12, 184]. На БМЗ была внедрена инъекционная технология введения с помощью струи газа в расплав мела, что снизило расход электроэнергии и уменьшило время плавки под током [13]. Разработано и внедрено устройство охлаждения графитированных электродов, которое позволило снизить расход электроэнергии и электродов [148].

При анализе результатов входного контроля различных видов металлолома и работы с поставщиками были выделены отдельные виды «чистого» металлолома, которые удовлетворяют условиям выплавки высококачественной кордовой стали [184].

Авторами обработаны режимы дегазации стали, обеспечивающие минимальное содержание газов в кордовой, обычной углеродистой и легированной сталях [174]. Наличие системы подачи ферросплавов и шлакообразующих на установке ковше-печь и вакууматоре обуславливает возможность получения элементов в стали с отклонениями $\pm 0,02$ % [49]. В [174] приведены данные о возможности получения стали с содержанием $N_2 \leq 0,002$ %.

Проектная технология выплавки стали не обеспечивала эффективного экранирования футеровки печи от излучения дуг и экономичного расхода электроэнергии на выплавку стали. Стойкость футеровки шлакового пояса составляла 100–150 плавов, а расход электроэнергии на жидкий период плавки достигал 460 кВт·ч/т [168].

Для отработки энергетических режимов и нахождения при-садок, способных эффективно поддерживать вспененный шлак во время плавления шихты, были выполнены исследования, на основании которых разработана и реализована технология, позволяющая снизить продолжительность жидкого периода плавки и расход электроэнергии, повысить производительность печи

и стойкость футеровки [153]. Такая технология делает возможным наведение активного пенистого шлака для экранирования футеровки печи и использование длинных дуг в глубоком пенистом шлаке, что увеличивает скорость плавления и нагрев ванны, сокращая тем самым длительность плавки.

1.2.2. Непрерывная разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок

Многочисленные задачи в области теплофизики стального слитка нашли отражение в работах В. А. Ефимова, Д. П. Евтеева, В. Т. Сладкоштитева, Ю. А. Самойловича, В. И. Тимошпольского и др. [39, 38, 136, 145, 173].

В ходе исследований кристаллизации расплава было установлено, что перепад температур по сечению любого геометрического объекта вызывает образование двухфазной зоны, отделяющей расплав от отвердевшей части. Учет выделения теплоты кристаллизации в двухфазной зоне сводится к соответствующему заданию зависимости эффективности удельной теплоемкости сплава от температуры. В настоящее время получили распространение два способа задания этой зависимости. Первый из них [173] основан на предположении о том, что внутри каждого локального объема сплава в пределах двухфазной зоны диффузионные процессы и в жидкой, и в твердой фазах успевают пройти с достаточной полнотой, так что температуры начала и конца кристаллизации совпадают с температурами ликвидуса (t_{lic}) и солидуса (t_{sol}) данного сплава, определяемыми в соответствии с равновесной диаграммой состояния. Второй способ [121] предполагает, что в соответствии с концепцией устойчивости в двухфазной зоне не существует перегретой твердой фазы или переохлажденной жидкости.

Довольно эффективным в решении задач затвердевания и охлаждения стальных слитков и заготовок является метод, изложенный в работах [20, 59, 86, 176].

Важнейшей проблемой при кристаллизации непрерывнолитых заготовок, теоретическому обсуждению которой посвящено

немало статей и монографий [40, 199, 203], является возникновение термических напряжений в затвердевающих заготовках. Задача определения термических напряжений решается с учетом таких специфических эффектов кристаллизации отливок, как эффект наращивания и релаксация напряжений при повышенных температурах. Эффект наращивания в математической форме при определении термических напряжений в затвердевающем слитке выполнен В. И. Лебедевым [65], Ю. А. Самойловичем [142], В. А. Журавлевым и В. Я. Генкиным [40].

Расчет растягивающих напряжений показал, что распределение термических растягивающих напряжений в твердой корке слитка с учетом наращивания имеет максимум, наиболее опасные с точки зрения возможности разрушения растягивающие напряжения расположены вблизи границы фаз.

Несмотря на простоту полученных в [203] решений, применение их ограничено рассмотрением плоской отливки.

Известно, что при повышенных температурах вследствие высокой подвижности атомов в кристаллической решетке металлов наблюдается самопроизвольное снижение напряжений даже при поддержании неизменной деформации, то есть релаксация напряжений [93].

По опытным данным И. Д. Дергунова [30], время релаксации углеродистой стали при комнатной температуре составляет 170–175 с, а при повышении температуры до 800–1000 °С снижается до 4–5 с. Учет эффекта релаксации напряжений приводит к необходимости решения системы уравнений термовязкоупругости при анализе термических напряжений в твердой корке, рост которой во времени протекает при повышенных температурах, близких к температуре кристаллизации изучаемого сплава. Протекание роста при повышенных температурах материала может быть описано уравнением Максвелла.

В общем случае задачу термовязкоупругости для затвердевающей отливки решают с учетом зависимости времени релаксации (так же, как и других механических характеристик металла) от температуры, что вызывает необходимость привлечения численных методов решения.

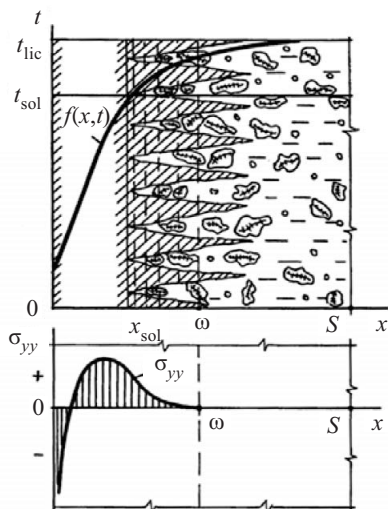


Рис. 1.3. Схема распределения температур и напряжений в сечении плоской отливки из бинарного сплава, затвердевающей в интервале температур $(t_{\text{lic}} - t_{\text{sol}})$

С учетом двухфазной зоны в сечении затвердевающей отливки выделяют три зоны, отличающиеся содержанием твердой фазы (растущих кристаллов) (рис. 1.3).

Граница раздела двухфазной зоны и центральной зоны чистого расплава четко не определена. На основании экспериментов по выливаю жидкого остатка затвердевающих отливок [28] для углеродистой стали удалось выявить так называемую границу выливаемости, для которой уровень температуры на 15–20 % ниже температуры равновесного ликвидуса изучаемого сплава. На рис. 1.4 граница выливаемости идентифицируется с условной границей затвердевшей части слитка и обозначена ω . Предполагается, что термические напряжения равны нулю на границе выливаемости, то есть: $\varphi \neq 0$ при $x \leq \omega$; $\varphi = 0$ при $x > \omega$.

Решение задачи теплопроводности для затвердевающего расплава осуществляется на основе гипотезы о квазиравновесном протекании процесса кристаллизации сплава. При этом уравнение переноса теплоты для затвердевающей отливки дополняется источником теплоты, мощность которого прямо пропорциональна скорости выделения твердой фазы (кристаллов).

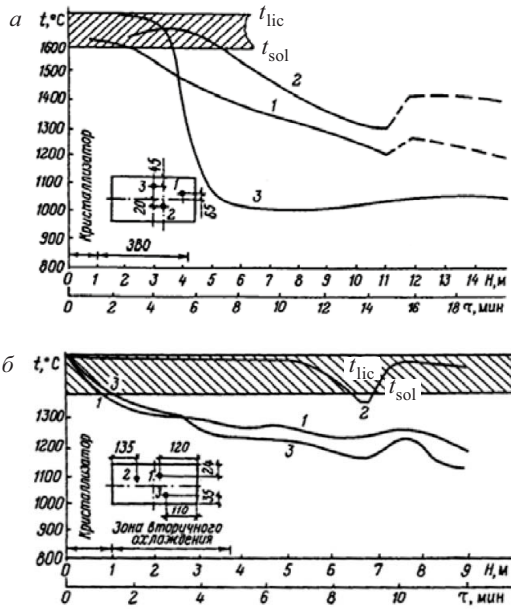


Рис. 1.4. Изменение температуры в процессе затвердевания и охлаждения непрерывнолитой заготовки сечением $0,25 \times 0,30$ м кордовой стали 70К:
a – скорость разливки 0,72 м/мин, *б* – скорость разливки 0,78 м/мин

Интегрирование производится с применением численного метода конечных разностей, что обеспечивает достаточную для практических целей точность при задании начального поля температуры и интенсивности внешнего охлаждения путем использования определенных коэффициентов конвективного (α_k) и радиационного теплообмена (σ).

Несмотря на широкое применение математического моделирования и расчетного анализа, самыми надежными и эффективными являются методы экспериментальных исследований посредством «вмораживания» термометрирующих блоков на основе термопар, разработанные под руководством доктора технических наук, профессора В. И. Тимошпольского сотрудниками Белорусского национального технического университета и работниками Белорусского металлургического завода, при этом

был использован опыт Центрального научно-исследовательского института черной металлургии имени И. П. Бардина (ЦНИИ-чермет) [160] и Всесоюзного научно-исследовательского института металлургической теплотехники (ВНИИМТ), устранены отдельные недостатки этих методик и учтены особенности разливки металла на современных МНЛЗ.

Способ измерения температур по сечению непрерывнолитых заготовок и применяемая аппаратура подробно описаны в [162], где приводятся результаты экспериментальных исследований процессов затвердевания заготовок сечением $0,125 \times 0,125$ м.

В связи с вводом на БМЗ в эксплуатацию блюминговой МНЛЗ применена единая для функционирующих на заводе машин методика измерения температур в стальных заготовках, отличающаяся универсальностью и надежностью измерений температур в стальном расплаве с необходимой точностью [162].

В качестве примера на рис. 1.5 и 1.6 приведена динамика температур в различных точках сечения непрерывнолитых заготовок сечением $0,25 \times 0,30$ м из стали 80К. На рис. 1.5 обращает на себя внимание характер изменения температур в точках 2 и 3: значительная турбулентность расплава в кристаллизаторе и конвективные потоки на протяжении первой половины зоны вторичного охлаждения определяют примерное равенство температур в этих точках. В дальнейшем до конца зоны вторичного охлаждения происходит резкое понижение температуры в точке 3, после чего она стабилизируется в диапазоне $1150\text{--}1250$ °С (температура измерялась в процессе исследований).

Монотонное снижение температур в точках 1 и 2 соответственно до 1300 и 1400 °С на уровне $10,5$ м технологической длины МНЛЗ сменяется их резким разогревом на 40 и 100 °С. Разогрев объясняется возможным разрушением дендритного моста и поступлением на этот уровень маточного расплава с большим теплосодержанием.

Анализ температурной кривой 2 на рис. 1.6 показывает, что уже на отметке 7 м технологической оси машины произошло смыкание дендритного моста, который, как и в предыдущем случае (см. рис. 1.5), разрушился. В дальнейшем процесс затвердевания принимает объемный характер.

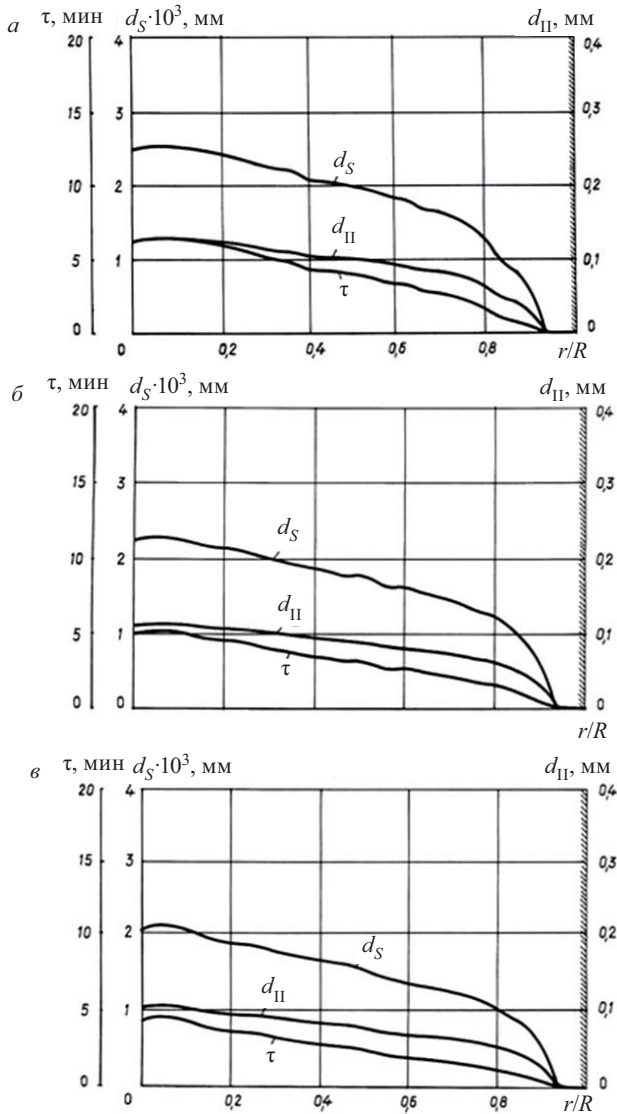


Рис. 1.5. Длительность пребывания металла в двухфазном состоянии (τ), размеры дендритной ячейки (d_{II}) и средний размер сульфидов железа (d_S) по сечению непрерывнолитой заготовки с $P_{\text{эKB}} = 0,155$ мм из стали 80К: *a* – при $\alpha_k = 175$ Вт/(м²·К); *б* – при $\alpha_k = 350$ Вт/(м²·К); *в* – при $\alpha_k = 580$ Вт/(м²·К)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах, непрерывная разливка и прокатка катанки	13
1.1. Краткая характеристика технологии производства катанки	13
1.2. Совершенствование технологии выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах, непрерывной разливки и прокатки катанки	17
1.2.1. Выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах	17
1.2.2. Непрерывная разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок	20
1.2.3. Прокатка катанки	27
Глава 2. Технология выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах для производства высококачественной катанки из углеродистых и легированных сталей	53
2.1. Модели прогнозирования и управления количеством неметаллических включений при внепечной обработке стали.....	53
2.2. Окисление примесных элементов при выплавке стали в дуговой печи.....	59
2.3. Методика прогнозирования массы жидкого металла.....	69
Глава 3. Моделирование упругопластических деформаций	76
3.1. Влияние технологических факторов на образование твердой корки в кристаллизаторе	76
3.2. Моделирование упругопластических деформаций и продольных напряжений при разливке стали в слитки круглого сечения.	82
3.3. Изменение поперечных напряжений по длине круглого слитка....	94
3.4. Моделирование механических и термических напряжений в стальном слитке	105
Глава 4. Теоретические основы технологии производства высококачественной катанки	118

4.1. Анализ неустановившегося процесса непрерывной высокоскоростной прокатки.....	118
4.2. Расчет поперечной деформации при высокоскоростной прокатке в чистовых блоках проволочных станов	131
4.2.1. Определение условных линий равных напряжений при прокатке в чистовом блоке.....	132
4.2.2. Вывод формулы уширения при прокатке в чистовом блоке с учетом массовых сил и натяжений	137
4.2.3. Влияние ширины раската на поперечную деформацию металла.....	141
4.2.4. Учет влияния массовых сил на поперечную деформацию металла при расчете калибровки валков чистового высокоскоростного блока.....	144
4.3. Влияние температурно-деформационных параметров на свойства катанки.....	147
4.3.1. Температурно-деформационная модель процесса прокатки на высокоскоростном проволочном стане	151
4.3.2. Теплообмен при прокатке в высокоскоростном чистовом блоке.....	166
4.3.3. Изменение температуры раската вдоль линии высокоскоростного проволочного стана.....	176
Глава 5. Производство катанки широкого марочного и размерного сортамента на высокоскоростном стане 150	193
5.1. Температурное поле раската при непрерывной прокатке в мини-блоках	193
5.2. Математическая модель процесса прокатки в высокоскоростном редуционно-калибрующем блоке.....	201
5.3. Повышение качества катанки и расширение технологических возможностей станов.....	227
5.4. Регламентация режима прокатки заготовок из легированных сталей	237
Заключение	239
Список использованной литературы.....	244