На правах рукописи

МИЩЕНКО ИГОРЬ ОЛЕГОВИЧ

Управление уровнем дефектов поверхности и макроструктуры непрерывно-литых слябов МНЛЗ радиально-криволинейного типа

Специальность 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2006

Диссертационная работа выполнена на кафедре металлургии стали Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета)

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор Дуб Алексей Владимирович

Официальные оппоненты:
Доктор технических наук Куклев Александр Валентинович
Кандидат технических наук Макаров Игорь Ильич

Ведущее предприятие: Государственный научный центр России ВНИИМЕТМАШ имени А.И. Целикова

Защита состоится «___»_____2006г в _____часов в диссертационном совете д.212.132.02 при Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) по адресу: 119049, г.Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 6, аудитория А-305, тел.: (095) 236-8217; факс: (095) 236-8217.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Автореферат разослан «___»_____2006 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д.212.132.02
Доктор технических наук, профессор А. Е.Семин

Общая характеристика работы:

Актуальность работы:

На сегодняшний день при вступлении России в мировую экономику, когда российский металлопрокат вступает в серьезную конкуренцию с продукцией иностранных сталелитейных компаний, отечественным металлопроизводителям приходится решать задачи, связанные с постоянным повышением качества и надежности готовых металлоизделий. Такие задачи можно решать, прежде всего, за счет создания комплексной системы контроля качества, которая обеспечивает качество металлопродукции на каждом этапе ее производства (начиная от непрерывно-литой заготовки и заканчивая готовыми металлоизделиями) не допуская попадание бракованной продукции на следующие переделы.

В сложившейся ситуации на первое место встает вопрос повышения качества непрерывно-литых слябов, являющихся основным сырьем для производства проката.

Значительных результатов в изучении закономерностей затвердевания и разработки основ совершенствования технологии непрерывной разливки достигли Г. П. Иванцов, А. И. Вейник, А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, Ю.В.Кряковский, В.С.Дуб, В. А. Ефимов, В. С. Рутес, Д. П. Ефтеев, И. Н. Колыбалов, В. Т. Борисов, Дж. Лин, Куклев А. В., Паршин В. М. Авторами уделено большое внимание теоретическим методам анализа и теплофизическим аспектам условий формирования структуры непрерывного слитка. В меньшей степени исследователи касаются практической реализации, разработанных методик в условиях промышленной эксплуатации машин непрерывной разливки. В связи с постоянно растущими требованиями к качеству готовой продукции требуется постоянное уточнение и актуализация полученных результатов, так как достигнутые до настоящего времени результаты не позволяют устойчиво снизить уровень поверхностных и внутренних трещин на слябах, разлитых на МНЛЗ радиально-криволинейного типа, ниже 10%.

Одной из основных проблем, встречающихся при разливке металла на УНРС радиально-криволинейного типа, является наличие трещин и ликвационных зон во внутренней структуре металла, а также на поверхности слябов. Неудовлетворительное качество макроструктуры и поверхности непрерывно-литых слябов приводит к образованию трещин различного типа во время горячей деформации в прокатных цехах и, как следствие, к увеличению себестоимости готового проката. Помимо этого, часть дефектов может проявиться в процессе последующей обработки или эксплуатации, что является недопустимым для создаваемых комплексных систем контроля качества.

Данная работа проведена в Московском институте стали и сплавов и конвертерном производстве ОАО «Северсталь», в состав которого входят пять МНЛЗ радиально-криволинейного типа конструкции завода «УРАЛМАШ». В настоящее время такие МНЛЗ наиболее часто встречаются на российских металлургических заводах. Поэтому решение поставленных задач (повышения качества непрерывно-литых слябов на МНЛЗ такого типа) может быть универсальным для отечественных металлургических компаний.

Цели и задачи работы:

Целью данной диссертационной работы является определение наиболее значимых факторов, определяющих качество непрерывно литых заготовок, а также разработка мероприятий, позволяющих снизить вероятность появления дефектов. В соответствии с этим в задачи работы входило:

- Выявление основных причин образования поверхностных и внутренних дефектов на слябах и способов воздействия на них.
- Разработка принципов воздействия на уровень дефектов непрерывно-литых заготовок.
- Разработка технологических мероприятий по снижению количества поверхностных и внутренних трещин непрерывно-литых слябов.

Научная новизна:

1. Установлено, что основными элементами, влияющими на появление поверхностных и внутренних трещин, являются: ***углерод, марганец, фосфор, сера***.

2. Определено, что сортамент сталей можно ранжировать на три группы по степени склонности к образованию поверхностных и на три группы по склонности к образованию внутренних трещин.

Склонность к образованию внутренних трещин: 1-я группа (наименее склонная к образованию внутренних трещин): углерод до 0,08%; марганец от 1,21% и выше; сера и фосфор до 0,01%. 2-я группа (средняя по склонности к образованию внутренних трещин): углерод от 0,081 до 0,18%; марганец от 0,81% до 1,2%; сера и фосфор от 0,011 до 0,02%.3-я группа (наиболее склонная к образованию внутренних трещин): углерод свыше 0,181%; марганец от 0,2% до 0,8%; сера и фосфор свыше 0,021%.

Склонность к образованию поверхностных трещин: 1-я группа (наименее склонная к образованию поверхностных трещин): углерод до 0,06%; марганец от 0,2% до 0,8%; сера и фосфор до 0,01%. 2-я группа (средняя по склонности к образованию внутренних трещин): углерод от 0,061 до 0,16%; марганец от 0,81% до 1,2%; сера и фосфор от 0,011 до 0,02%.3-я группа (наиболее склонная к образованию внутренних трещин): углерод свыше 0,161%; марганец свыше 1,21%; сера и фосфор свыше 0,021%.

3. Определены наиболее значимые технологические параметры, оказывающие влияние на качество непрерывно-литых слябов (для каждой сортаментной группы):

- на появление поверхностных сетчатых трещин - **температура стали в промежуточном ковше и режим вторичного охлаждения слитка**;
- на появление внутренних гнездообразных трещин - **скорость разливки и состояние поддерживающей системы МНЛЗ**.

4. Создана методика, включающая расчетный алгоритм, позволяющая обеспечить рациональные условия затвердевания непрерывнолитой заготовки.
5. Разработана математическая модель расчета температурного поля непрерывно-литого сляба и показана целесообразность учета величины коэффициента теплоотдачи при расчете плотности орошения.
6. Оптимизирован расчет расходов воды в последних зонах вторичного охлаждения МНЛЗ и предложен рациональный температурный режим охлаждения заготовки.

Практическая значимость:

1. Разработана и адаптирована методика расчета режимов вторичного охлаждения непрерывно-литого слитка и предложены новые технологические режимы разливки для разных групп сталей (по склонности к образованию трещин), позволяющие снизить пораженность слитка трещинами.
2. Определены наиболее вероятные зоны образования дефектов непрерывно-литых слябов:
   - для поверхностных сетчатых трещин - радиальный участок поддерживающей системы МНЛЗ.
   - для внутренних гнездообразных трещин - конец радиального участка и зона разгиба непрерывно-литого слитка.
3. Разработан оптимальный режим вторичного охлаждения, использование которого позволило снизить уровень зачистки непрерывно-литых слябов, увеличить долю металла, передаваемого «горячим всадом» в прокатные цеха, снизить уровень отсортировки металла по трещинам и пленам на горячекатанном металле в прокатных цехах.
4. Созданная база технологических данных совместно с математической моделью, ее использующая, рекомендована для включения в АСУ процесса непрерывной разливки конвертерного производства.
5. Разработанная математическая модель может служить базой для вновь разрабатываемой системы автоматического контроля качества непрерывно-литых слябов на работающих МНЛЗ.

Публикации:

1. Известие ВУЗов «Черная металлургия»; «Влияние технологических факторов на качество непрерывно литых стальных заготовок», выпуск 1, 2006 г.
2. Известие ВУЗов «Черная металлургия»; «Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывно-литого слитка», выпуск 3, 2006 г.

Объем работы:

Диссертация состоит из 4 глав, основных выводов и приложения. Работа изложена на 130 страницах, в 23 таблицах, 47 рисунках, со ссылками на 82 литературных источника.

Апробация работы:

Материалы по данной работе доложены на научно-технической конференции молодых специалистов и инженеров ОАО «Северсталь» в г. Череповце 28 июня 2001 года.

Изучение влияния химического состава металла на склонность к образованию поверхностных и внутренних дефектов

Объектом данного исследования является МНЛЗ радиально-криволинейного типа, поскольку именно данный тип машин является наиболее распространенным среди встречающихся в настоящее время в действующих отечественных сталеплавильных цехах.

Для выбора факторов, определяющих качество непрерывнолитой заготовки, был проведен статистический анализ их пораженности дефектами разного вида. Результаты свидетельствуют о том, что самыми распространенными видами дефектов на непрерывнолитых слябах, разливаемых на МНЛЗ конвертерного производства ОАО «Северсталь» являются внутренние гнездообразные и поверхностные сетчатые трещины.

Для сбора информации об изменении основных технологических параметров непрерывной разливки стали (температуры металла в промежуточном ковше, скорости разливки, расходов воды во всех зонах вторичного охлаждения), контроле фактической температуры поверхности разливаемого слитка, а так же контроля за состоянием роликовой проводки УНРС (соблюдение технологического клина по длине поддерживающей системы) и систем вторичного охлаждения (количество работающих форсунок и качество распыла факела форсунки) была разработана методика проведения активного эксперимента.

Влияние скорости разливки и среднего отклонения расстояний между роликами большого и малого радиуса на качество макроструктуры слябов

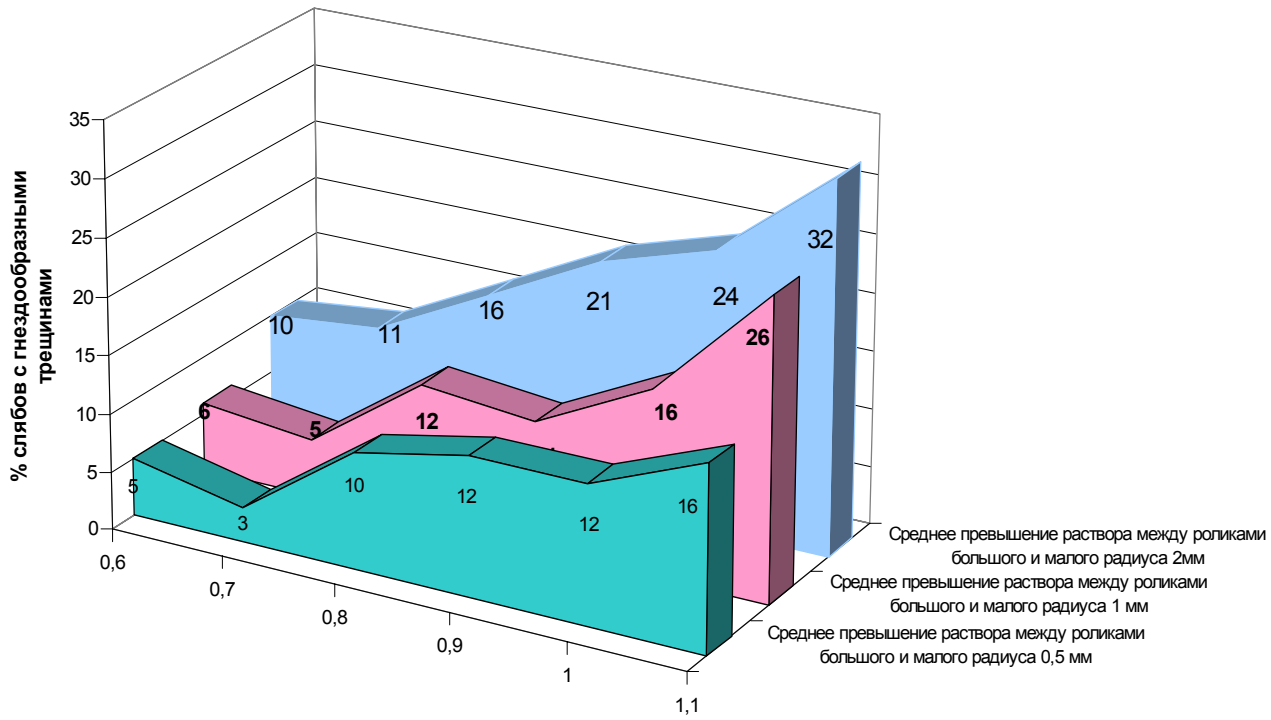


Рис.1

Для его реализации на МНЛЗ № 1 были установлены оптические пирометры фирмы «Райтек». Первый пирометр располагали в зоне разгиба слитка, а второй - на горизонтальном участке в конце зоны вторичного охлаждения.

В результате эксперимента был собран массив, включающий 27 технологических параметров разливки и 24 параметра контроля состояния оборудования, по 56 плавкам,

В результате обработки данных было установлено, что с увеличением отклонений между роликами большого и малого радиусов поддерживающей системы (роликовой проводки) МНЛЗ увеличивается количество слябов с внутренними гнездообразными трещинами, а также увеличивается непосредственно балл самих трещин (рис.1). Аналогичным образом на уровень внутренних дефектов влияет и скорость разливки.

Вместе с тем, эти же факторы не оказывают значимого влияния на пораженность слябов поверхностными дефектами.

Исследование показало также различие во влиянии температуры металла в промежуточном ковше на пораженность слябов поверхностными и внутренними дефектами. С одной стороны, не выявлено заметного влияния температуры металла в промежуточном ковше на пораженность слябов внутренними гнездообразными трещинами, с другой – изменение температуры жидкой стали и организации теплоотвода в зоне вторичного охлаждения (рис. 2 и 3) имеют значимое влияние на уровень поверхностных дефектов стали.

Таким образом, вероятно, что при формировании внутренних трещин в слябах значимыми оказываются механические напряжения, действующие на слиток в зоне вторичного охлаждения. А при формировании поверхностных трещин – термические напряжения, уровень которых определяют температура жидкой стали и организация теплоотвода от поверхности непрерывной заготовки. Проведенный эксперимент, подтверждает гипотезу, выдвинутую также ранее рядом авторов, о том, что внутренние трещины в слябах образуются вследствие изгибания, выпрямления или прокатки затвердевшей оболочки заготовки с жидкой сердцевиной при изогнутых зажатых роликах и при нарушении настройки роликовой проводки МНЛЗ.

Влияние температуры металла в промежуточном ковше на образование сетчатых трещин

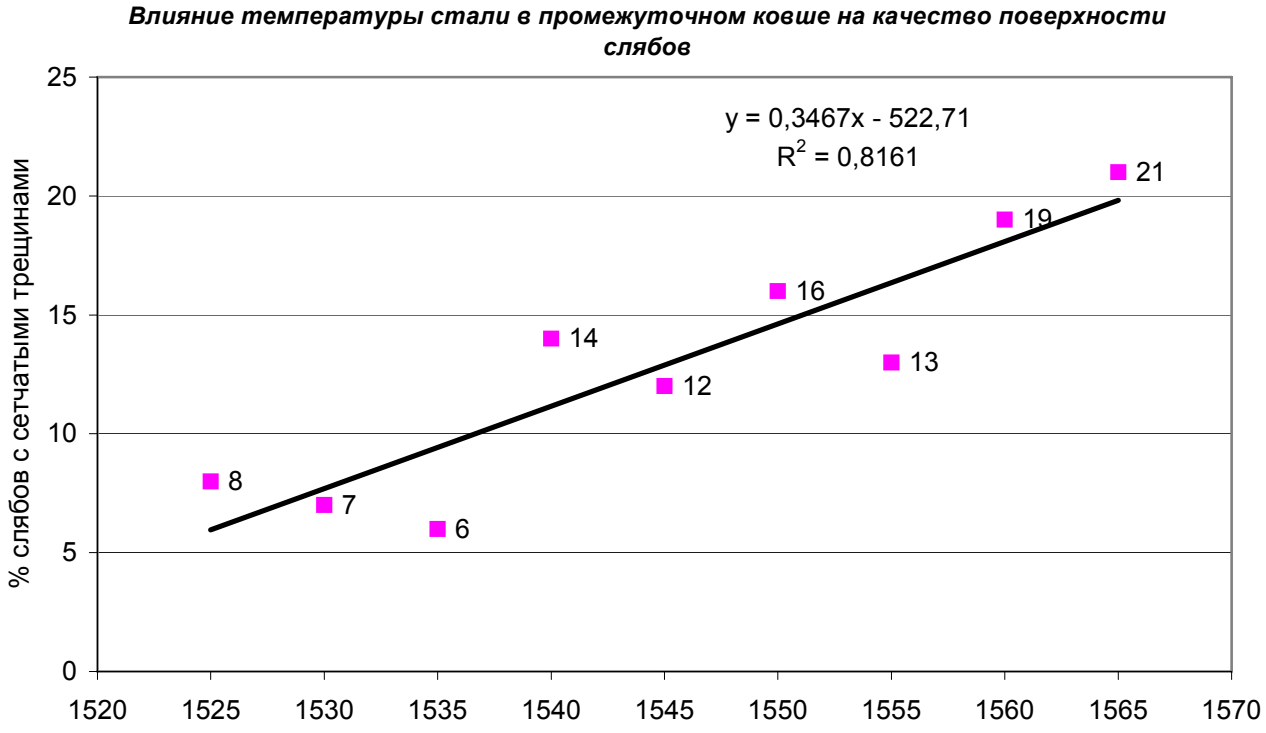


Рис. 2

y = 0,3467x - 522,71 (влияние температуры металла в п/к на образование сетчатых трещин); коэффициент достоверности аппроксимации (R2) = 0,816

Влияние работы вторичного охлаждения на образование поверхностных трещин

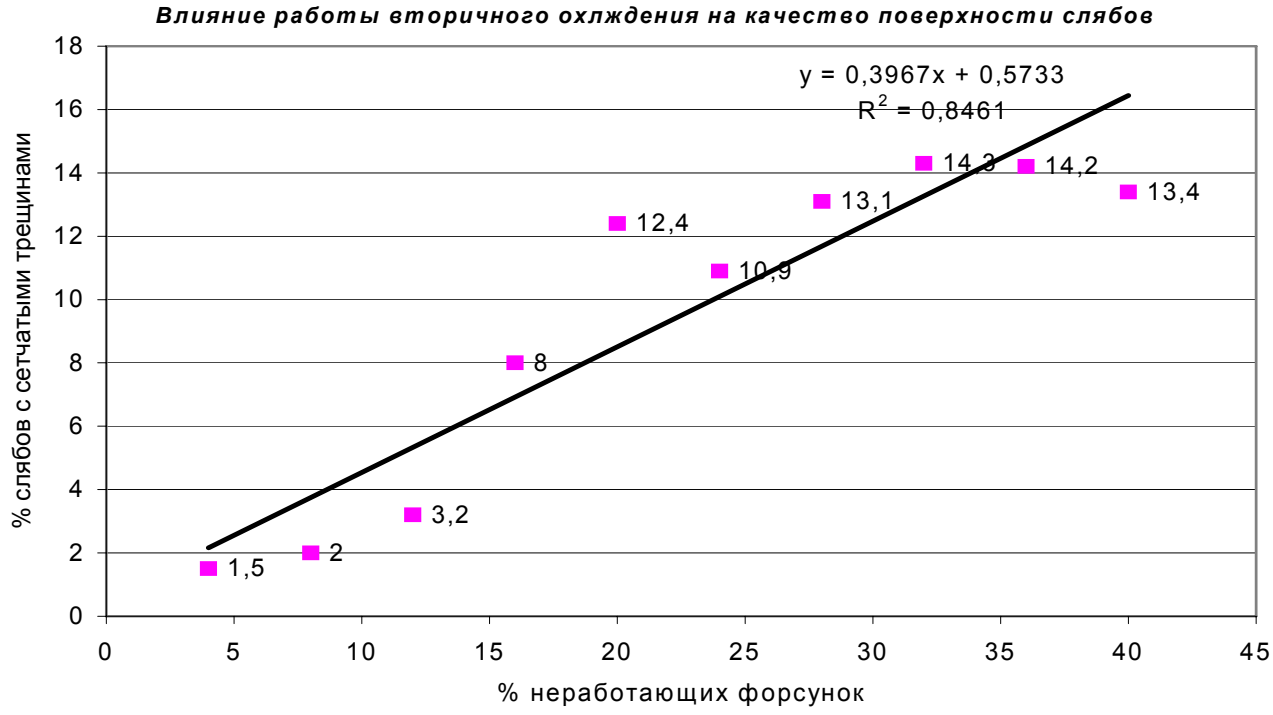


Рис. 3

y = 0,7933x + 0,5733 (влияние температуры металла в п/к на образование сетчатых трещин); коэффициент достоверности аппроксимации (R2) = 0,8461

На основе проведенного анализа основных технологических факторов показано, что:

1. Основными факторами, оказывающими влияние на качество макроструктуры слябов при традиционной технологии непрерывной разливки на МНЛЗ радиально-криволинейного типа, являются скорость вытягивания слитка и отклонения расстояний между роликами большого и малого радиусов поддерживающей системы.
2. Основными факторами, оказывающими влияние на качество поверхности слябов, являются температура стали в промежуточном ковше и организация теплоотвода в зоне вторичного охлаждения слитка.
3. Установлено, что:
   - на появление внутренних трещин в слябах оказывают влияние механические напряжения, действующие на слиток в зоне вторичного охлаждения, вследствие изгибания, выпрямления или прокатки затвердевшей оболочки заготовки с жидкой сердцевиной при изогнутых зажатых роликах и при нарушении настройки роликовой проводки МНЛЗ.
   - А на формирование поверхностных трещин – термические напряжения, зависящие от температуры жидкой стали и организации теплоотвода от поверхности непрерывной заготовки.

Известно мнение, что химический состав также может оказать влияние на склонность непрерывнолитого металла к трещинобразованию, поэтому в данной работе разработана методика, позволяющая выявить влияние химического состава металла на количество поверхностных и внутренних дефектов непрерывно-литой заготовки.

На начальном этапе проведения работы были собраны статистические данные по качеству непрерывно-литых слябов, а именно, процент пораженности слябов поверхностными и внутренними трещинами, в зависимости от содержания химических элементов в готовом металле.

Химический анализ определяли по ковшевой пробе, отобранной по ходу разливки, внутренние гнездообразные трещины – по анализу макроструктуры поперечных темплетов, а

поверхностные сетчатые трещины – по анализу осветленной дорожки на поверхности непрерывно-литых слябов.

Для количественной оценки гнездообразных трещин, обеспечения достоверности сведений о макроструктуре и соответствия ее технологическим параметрам разливки, было проведено исследование распространения переходной зоны в заготовке при традиционных скоростях (0.8 - 1 м/мин). По анализу темплетов было показано, что при указанных скоростях разливки влияние переходного режима (переход с плавки на плавку, замена промежуточных ковшей, погружных стаканов и т. п.) на макроструктуре заготовки проявляется на длине не более 10 метров после окончания этого периода. Поэтому было принято решение отбирать поперечные темплеты только на стационарных режимах, т. е. на рабочей скорости разливки (0,8 – 1м/мин) и не менее, чем после разливки 10 метров после окончания переходного режима. Макроструктуру слябов контролировали на поперечных темплетах.

В основу методики оценки качества поверхности заложены разработанные ранее методы оценки поверхности слябов лабораториями непрерывной разливки и металловедения ОАО «Северсталь». На каждом слябе, непосредственно перед его приемкой производили «светление» по всей поверхности малого радиуса в виде извилистого следа от ручного газо-кислородного резака - «змейки». Затем по месту осветленной поверхности – производили количественную оценку сетчатых трещин на поверхности сляба. Таблица, дающая определение каждому баллу поверхности слябов приведена в приложении 3 диссертации.

Структура массива по изучению влияния склонности металла к образованию гнездообразных и сетчатых трещин, выглядит следующим образом: в качестве переменных величин использовались - углерод, кремний, марганец, фосфор, сера, сера плюс фосфор, алюминий, азот, отношение марганца к сере, в качестве функции – балл осевых трещин, трещин перпендикулярных граням, гнездообразных трещин, а также балл поверхностных сетчатых трещин.

Для статистического анализа влияния химического состава на уровень пораженности внутренними гнездообразными трещинами был собран массив, состоящий из 990 плавок - массив 1. Его статистические параметры приведены в таблице1.

Таблица 1

Статистические характеристики массива для исследования уровня пораженности металла внутренними гнездообразными трещинами.

Статистические характеристики	C	Si	Mn	P	S	S + P	Al	N	Mn/S	Осевые трещины, балл	Трещины перпендикулярные граням, балл	Гнездообразные трещины, балл
Минимальное значение	0,02	0,007	0,182	0,005	0,003	0,013	0,01	0,004	12	0	0	0
Максимальное значение	0,29	1,44	1,71	0,025	0,027	0,043	0,42	0,011	480	5	2	5
Среднее значение	0,124	0,226	0,689	0,013	0,010	0,023	0,057	0,005	95	0,556	1,06	0,43
Стандартное отклонение	0,055	0,226	0,689	0,013	0,004	0,005	0,056	0,003	89,67	0,51	0,383	0,505

Для изучения влияния химического состава на склонность к образованию поверхностных сетчатых трещин был собран массив из 125 плавок, разлитых на УНРС конвертерного производства ОАО «Северсталь» в период с января по июль 2000-2001 годов (табл.2).

Таблица 2

Статистические характеристики массива для исследования уровня пораженности металла поверхностными сетчатыми трещинами.

Статистические характеристики	C	Si	Mn	P	S	S + P	Al	N	Mn/S	Сетчатые трещины
Минимальное значение	0,034	0,005	0,173	0,004	0,003	0,015	0,02	0,004	18	0
Максимальное значение	0,32	1,56	1,83	0,023	0,029	0,056	0,45	0,012	422	12
Среднее значение	0,142	0,185	0,861	0,011	0,012	0,028	0,051	0,006	89	4,846
Стандартное отклонение	0,062	0,221	0,445	0,003	0,004	0,006	0,058	0,004	91,86	3,891

Представительность собранной информации позволила установить взаимосвязи пораженности слябов гнездообразными (внутренними) и сетчатыми (поверхностными) трещинами (в баллах) от химического состава стали (по ковшевой пробе).
Полученные зависимости представлены на рисунках 4 и 5.

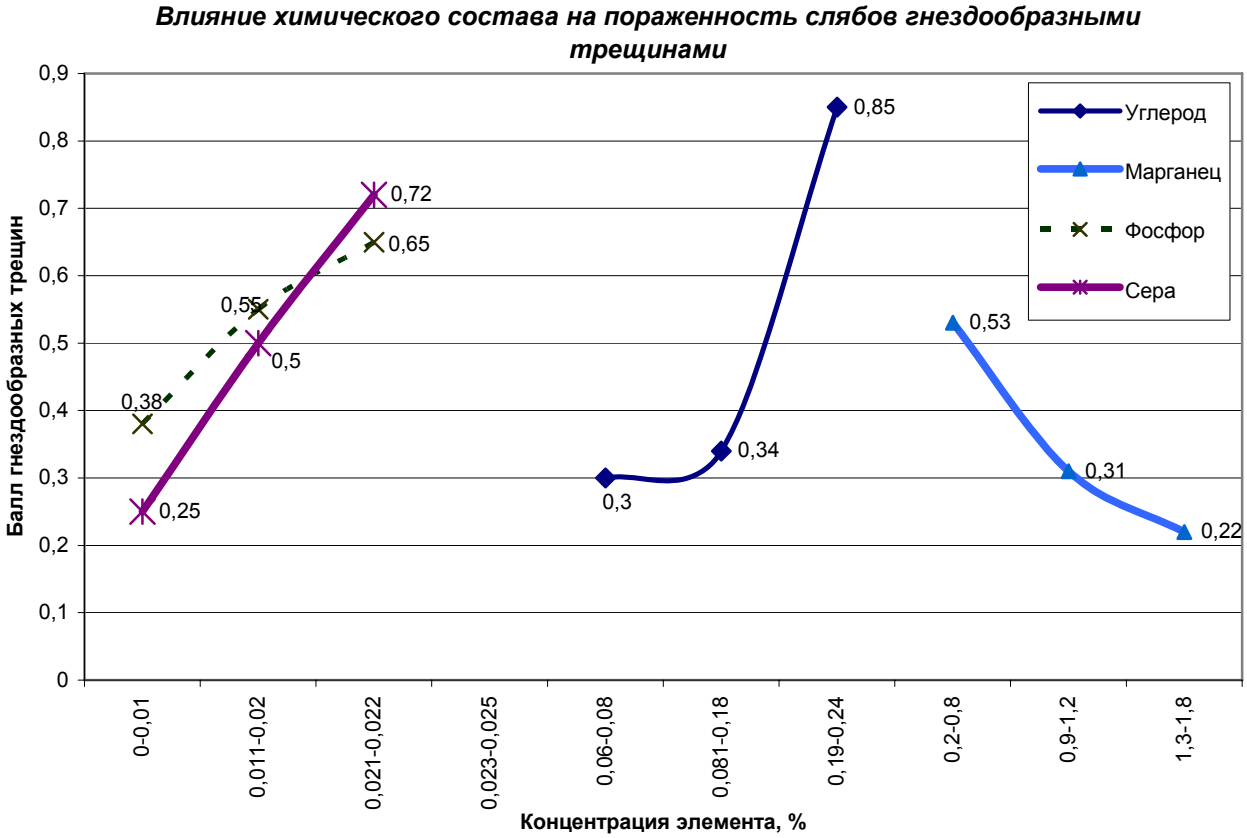


Рис. 4

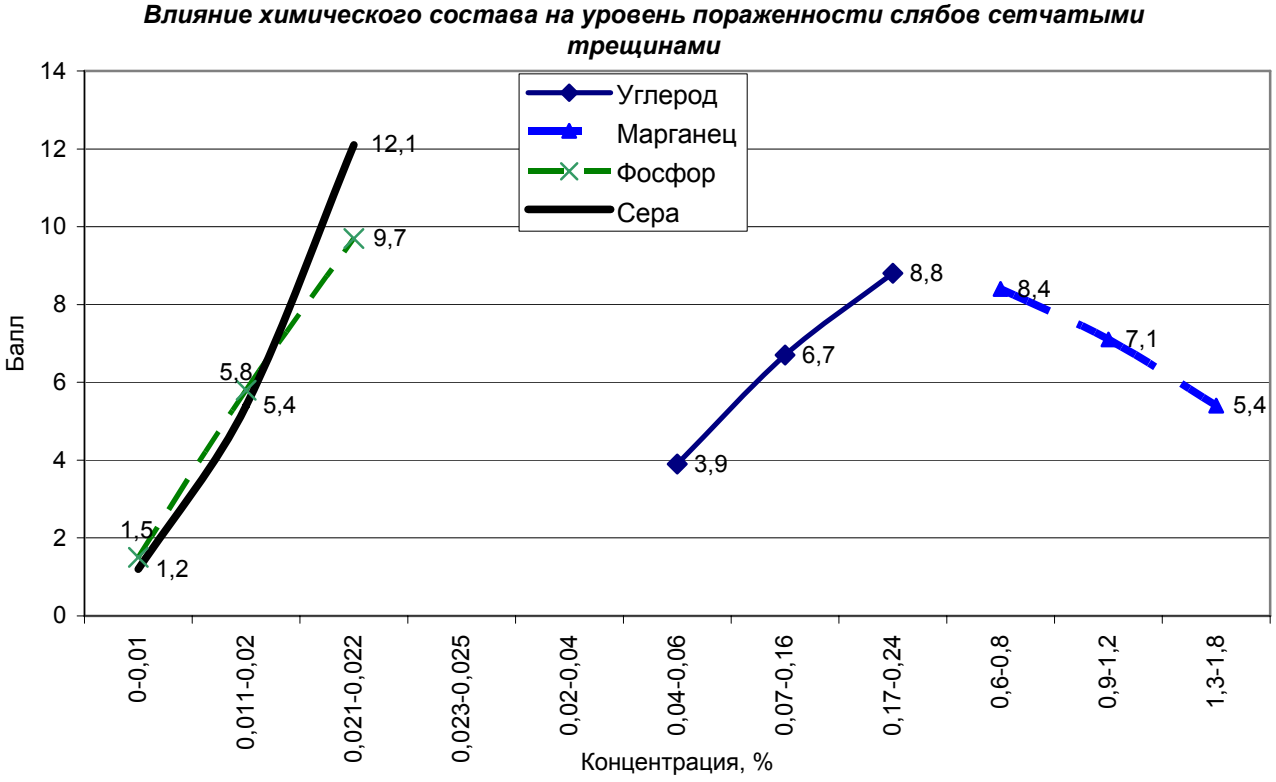


Рис. 5

Ниже представлены выражения парной корреляции для всех исследуемых элементов химического состава металла на склонность к образованию внутренних гнездообразных и поверхностных сетчатых трещин.

Таблица 3

Влияние химического состава на пораженность слябов гнездообразными трещинами.

№ п/п	**Элемент химического состава**	**Выражение парной корреляции**	коэффициент достоверности аппроксимации
1	**Углерод**	**y = 0,0745x + 0,0227**	**0,6862**
2	Кремний	y = -0,0393x + 0,5873	0,6354
3	**Марганец**	**y = -0,0631x + 0,6439**	**0,7977**
4	**Сера**	**y = 0,0787x + 0,1073**	**0,6937**
5	**Фосфор**	**y = 0,0354x + 0,2953**	**0,87**
6	Сера + Фосфор	y = 0,0789x + 0,15	0,8323
7	Алюминий	y = -0,034x + 0,428	0,1271
8	Азот	y = 0,0054x + 0,3971	0,035
9	Марганец/Сера	y = -0,0336x + 0,6704	0,7662

Таблица 4

Влияние химического состава на пораженность слябов сетчатыми трещинами.

№ п/п	**Элемент химического состава**	**Выражение парной корреляции**	коэффициент достоверности аппроксимации
1	**Углерод**	**y = 0,6345x + 2,9927**	**0,7087**
2	Кремний	y = 0,1582x + 6,68	0,09
3	**Марганец**	**y = 1,1774x + 3,9893**	**0,8973**
4	**Сера**	**y = 1,223x - 2,3267**	**0,8636**
5	**Фосфор**	**y = 1,6261x - 2,9533**	**0,8215**
6	Сера + Фосфор	y = 0,9339x - 0,9286	0,8594
7	Алюминий	y = 0,35x + 6	0,3145
8	Азот	y = -0,1488x + 5,2071	0,1604
9	Марганец/Сера	y = -0,8511x + 10,45	0,8707

Из проанализированного перечня химических элементов наиболее значимыми по влиянию на появление поверхностных и внутренних трещин в металле изученного состава, являются: ***углерод, марганец, фосфор, сера***. При этом необходимо отметить, что сера показала очень сильное влияние, как на внутренние, так и на поверхностные трещины. В данном исследовании практически не выявилось влияние кремния на склонность металла к образованию трещин, хотя, по мнению многих авторов, данный элемент должен проявлять свое влияние на формирование литой структуры стали при кристаллизации, и, следовательно, влиять на свойства. Вероятно это можно объяснить большим количеством плавок в исследуемых массивах с содержанием кремния менее 0,03%, при котором отрицательное влияние кремния на первичную кристаллическую структуру становится несущественным и незначительным количеством плавок с содержанием кремния в диапазоне от 0,20 до 0,30% (18% плавок с содержанием кремния в указанном диапазоне), в котором кремний оказывает наиболее сильное охрупчивающее влияние. Кроме того, по-видимому, при таком композиционном составе металла (исследуемые содержания марганца, серы, фосфора и цветных металлов) он не проявляет заметного охрупчивающего влияния.

На основании статистической обработки всех массивов была составлена окончательная ранжировка сталей по склонности к образованию внутренних гнездообразных и поверхностных сетчатых трещин от содержания химических элементов.

Таблица 5

Склонность к образованию внутренних трещин

Группа	Углерод, %	Марганец, %	Сера, %	Фосфор, %
1 группа (наименее склонная)	0 – 0,08	Более 1,21	0 – 0,01	0 – 0,01
2 группа (средняя склонность)	0,081 – 0,18	0,81- 1,20	0,011 – 0,020	0,011 – 0,020
3 группа (наиболее склонная)	более 0,181	0,20 – 0,80	более 0,021	более 0,021

Таблица 6

Склонность к образованию поверхностных трещин

Группа	Углерод, %	Марганец, %	Сера, %	Фосфор, %
1 группа (наименее склонная)	0 – 0,06	Более 1,21	0 – 0,01	0 – 0,01
2 группа (средняя склонность)	0,061 – 0,16	0,81- 1,20	0,011 – 0,020	0,011 – 0,020
3 группа (наиболее склонная)	Более 0,161	0,20 – 0,80	более 0,021	более 0,021

Следует отметить, что концентрационные границы для углерода в таблицах 5 и 6 имеют некоторые отличия. Т. е. при более низких концентрациях углерода вероятность образования поверхностных дефектов выше, чем внутренних. Вероятно, в первую очередь это связано с тем, что поверхностные дефекты зарождаются в верхней части МНЛЗ (в кристаллизаторе или же в верхних секциях зоны вторичного охлаждения), когда толщина корочки еще незначительная (15 – 30мм) и, соответственно, прочность ее невелика. Т. к. при снижении содержания углерода снижается прочность металла, то, при прочих равных условиях, при снижении концентрации углерода и, соответственно, при снижении прочности корочки слитка, трещина будет образовываться при более низких значениях уровня возникающих напряжений.

Таким образом:

1. Разработана методика, позволившая оценить значимость большинства параметров непрерывной разливки и состояния основного технологического оборудования на качество непрерывно-литой заготовки.
2. Проанализирован металл во всех диапазонах содержания примесей, характерных для действующего производства. Установлены пределы, при которых содержание элементов (примесей) оказывает наибольшее влияние на склонность металла к образованию дефектов.
3. На основе статистического анализа показано, что химическими элементами, влияющими на склонность металла к образованию поверхностных и внутренних трещин, являются: ***углерод, марганец, фосфор, сера***.
4. Весь изученный сортамент марок сталей был ранжирован на три группы по степени склонности к образованию поверхностных и три группы по склонности к образованию внутренних трещин.
   - ***Склонность к образованию внутренних трещин (по возрастанию):*** 1-я группа - углерод от 0 до 0,08%; марганец от 1,21% и выше; сера и фосфор от 0 до 0,01%. 2-я группа - углерод от 0,081 до 0,18%; марганец от 0,81% до 1,2%; сера и фосфор от 0,011 до 0,02%.3-я группа - углерод свыше 0,181%; марганец от 0,2% до 0,8%; сера и фосфор свыше 0,021%.

- ***Склонность к образованию поверхностных трещин(по возрастанию):*** 1-я группа - углерод от 0 до 0,06%; марганец от 0,2% до 0,8%; сера и фосфор от 0 до 0,01%. 2-я группа - углерод от 0,061 до 0,16%; марганец от 0,81% до 1,2%; сера и фосфор от 0,011 до 0,02%.3-я группа - углерод свыше 0,161%; марганец свыше 1,21%; сера и фосфор свыше 0,021%.

5. В данном исследовании практически не выявилось влияние кремния на склонность металла к образованию трещин. Это связано с большим количеством плавок в исследуемых массивах с содержанием кремния либо менее 0,03% , либо более 0,3% .

Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывно-литого слитка.

Поскольку условия теплоотвода от поверхности слитка являются основной характеристикой, которая определяет его качество, то, следовательно, необходимо определить оптимальное температурное поле для реальных условий охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения, измерить фактические характеристики этого температурного поля и рассчитать оптимальные условия теплоотвода от поверхности заготовки.

Для определения оптимального температурного поля слитка применен метод его моделирования. Необходимо отметить, что под температурным полем слитка здесь подразумевается температура поверхности по его длине, поскольку, на сегодняшний день, только эту характеристику можно успешно измерять в промышленных условиях.

В плоском слитке стали коэффициент теплоотдачи α в зоне вторичного охлаждения должен монотонно убывать по определенному закону. Лучшим считается такой режим, который обеспечивает наибольшую скорость затвердевания при максимально допустимых термических напряжениях. Кроме того предполагается, что напряжения пропорциональны перепаду температуры и необходимо соблюдать условие равнопрочности по длине оболочки.

На начальном этапе исследований были собраны рекомендации по улучшению режима охлаждения:

1. умеренная интенсивность снижения температуры внешних поверхностей слитка, особенно на этапе формирования оболочки (для устранения поверхностных трещин);
2. уменьшение градиентов температуры по толщине оболочки (для предотвращения трещинообразования и искажения профиля слитка);
3. выравнивание скорости охлаждения в любом поперечном сечении оболочки (для предотвращения трещинообразования и искажения профиля слитка);
4. приблизительная прямолинейность распределения кривых температуры в продольном сечении затвердевшей части слитка и примерная эквидистантность этих кривых (для предотвращения трещинообразования и искажения профиля слитка);
5. исключение разогрева внешних поверхностей слитка на каком-либо локальном участке (для предотвращения трещинообразования и искажения профиля слитка);
6. обеспечение такой интенсивности охлаждения слитка в районе окончания затвердевания, при которой получается плотная (без пористости) осевая зона, и не возникают осевые трещины;
7. постоянство температуры по периметру любого поперечного сечения слитка (для предотвращения искажения профиля слитка и уменьшения таких дефектов, как осевые трещины и осевая пористость);

На основе этих рекомендаций был предложен критерий оптимальности для непрерывного слитка стали. Этот критерий описывается формулой:

$$I_3 = \int_0^{t_з} \int_{b-\xi(z)}^{b} \left| \Delta \right| dx dt \quad \rightarrow \min, \qquad (1)$$

где $t_з$ – время полного затвердевания, с; b – толщина корочки слитка, м; Δ - относительное отклонение скорости охлаждения слитка.

Критериальное условие заключается в том, что суммарное относительное отклонение скорости охлаждения для различных элементов затвердевшего металла от его среднего значения должно быть минимальным. Таким образом, используя выбранную математическую модель затвердевания слитка, можно рассчитать требуемые параметры

охлаждения, обеспечивающие минимум выбранного критерия, а затем, учитывая технические и технологические ограничения оборудования, выбрать нужный режим охлаждения на МНЛЗ.

Из известных существующих моделей расчета температурного поля непрерывного слитка за основу нашего расчета была выбрана квазиравновесная модель двухфазной зоны, так как она наиболее полно описывает все процессы, происходящие при кристаллизации в слитке и, следовательно, позволяет наиболее точно рассчитать характеристики температурного поля.

На основании этой модели было получено выражение для расчета температуры поверхности по длине непрерывного слитка, обеспечивающего минимум термических напряжений.

Так как в слитке существует как жидкая, так и твердая фаза, то для расчета доли твердой фазы использовали следующее выражение:

$$S = \frac{V_{тв}}{V_{тв} + V_{ж}}, \qquad (2)$$

где $V_{тв}$ - доля твердой фазы;
$V_{ж}$ - объем жидкой фазы;

Процессы тепло и массопереноса в слитке в общем виде описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} \rho \cdot \vartheta \cdot \dfrac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2} + V_x \cdot \dfrac{\partial T}{\partial x} + W_T \\ \dfrac{\partial}{\partial t}\left((1-S)\cdot C\right) = D \cdot \dfrac{\partial}{\partial x}\left((1-S)\cdot \dfrac{\partial C}{\partial x}\right) + V_x \cdot \dfrac{\partial C}{\partial x} + W_c \\ T = f(C) \end{cases} \qquad (3)$$

где ρ - плотность, кг/м^3;
υ - теплоемкость, Дж/(кг С);
Т - температура, С;
t - время, с;
x - координата:
W_T - объемная плотность источников тепла;
С - концентрация;
W_c - объемная плотность источников концентрации;
λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м С);
D - коэффициент диффузии, м^2/с;
V_x - проекция вектора скорости;

Система уравнений (3) не имеет аналитического решения, поэтому решение находили численным методом. Использовали явную разностную схему.

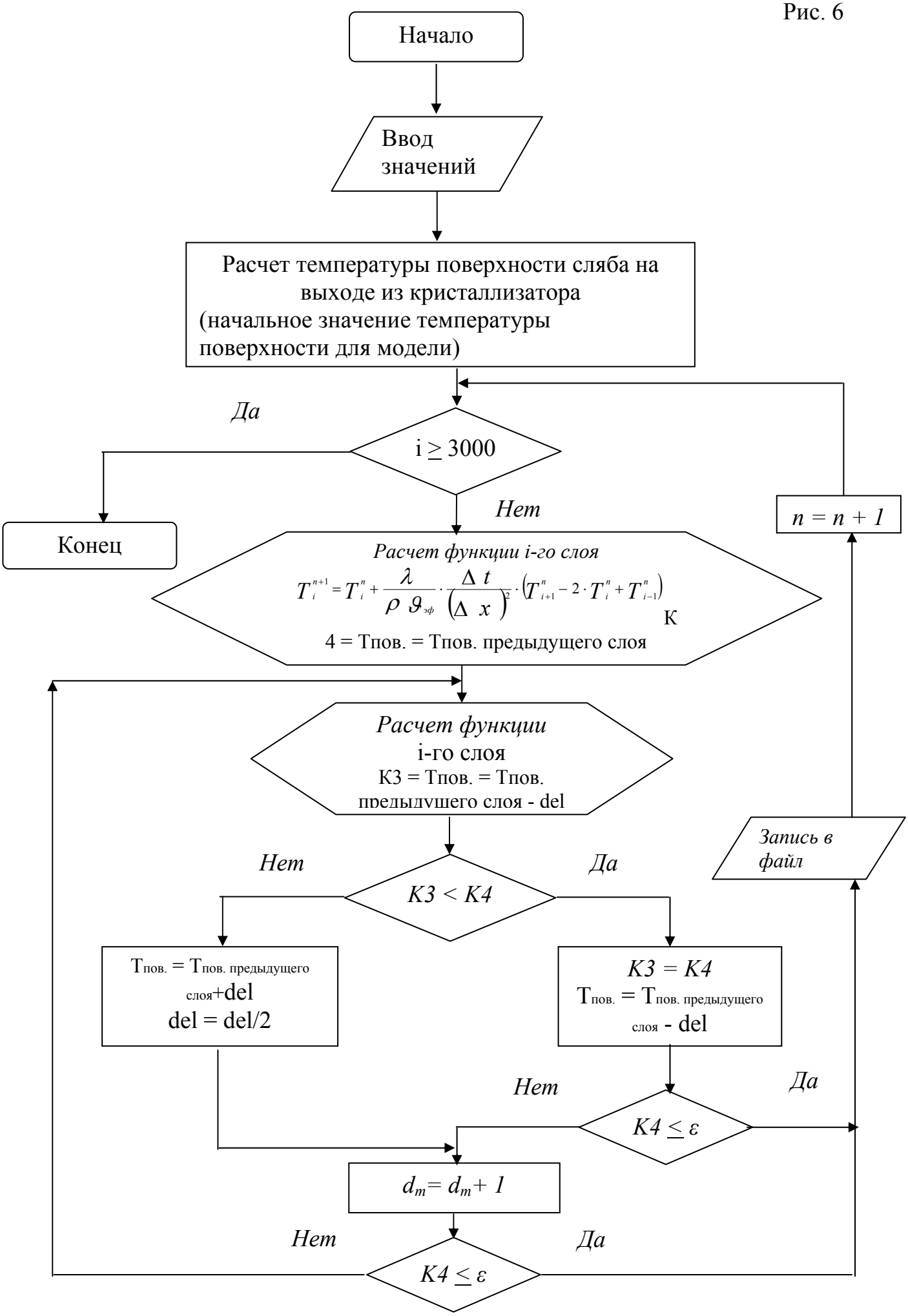
С помощью представления частных производных в виде конечных разностей было получено итоговое уравнение для расчета температурного поля:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\lambda}{\rho \vartheta_{эф}} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot \left(T_{i+1}^n - 2 \cdot T_i^n + T_{i-1}^n\right) \qquad (4)$$

где t - шаг по времени, с;
x - шаг по толщине слитка, м;

На рисунке 6 представлена блок-схема алгоритма расчета температурного поля слитка:

Рис. 6


Начало
Ввод значений
Расчет температуры поверхности сляба на выходе из кристаллизатора (начальное значение температуры поверхности для модели)
Да
i ≥ 3000
Конец
Нет
n = n + 1
Расчет функции i-го слоя
$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\lambda}{\rho\, \vartheta_{эф}} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{i+1}^n - 2 \cdot T_i^n + T_{i-1}^n)$
К
4 = Тпов. = Тпов. предыдущего слоя
Расчет функции
i-го слоя
К3 = Тпов. = Тпов. предыдущего слоя - del
Запись в файл
Нет
Да
K3 < K4
Тпов. = Тпов. предыдущего слоя+del
del = del/2
K3 = K4
Тпов. = Тпов. предыдущего слоя - del
Нет
Да
K4 ≤ ε
$d_m = d_m + 1$
Нет
Да
K4 ≤ ε

Расчет температурного поля слитка осуществлялся по следующему алгоритму:

1. ввод начальных значений параметров слитка;
2. расчет температуры затвердевания;
3. определение коэффициента теплоотдачи в кристаллизаторе, нахождение распределения температуры по сечению слитка к моменту выхода его из кристаллизатора;
4. расчет температурного поля, нахождение наименьшего значения функционала для сечения, определение границ двухфазной зоны и затвердевшей части слитка, запись результатов;
5. определение времени затвердевания, нахождение значения функционала и температурного поля слитка для всего времени затвердевания;

Для расчета использовали данные из таблицы 7.

Таблица 7

Исходные данные для расчетов по модели:

Наименование параметра	**Обозначение**	**Величина**	**Единица измерения**
Число точек по толщине	nn	25	шт
Удельная теплота кристаллизации	Q	270	кДж
Теплоемкость	χ	700	Дж/кг*^{0}C
Температура плавления	$T_{пл}$	1539	^{0}C
Коэффициент теплопроводности	λ	29	Вт/(м ^{0}C)
Температура в промежуточном ковше	$T_{п/к}$	1520, 1540, 1560	^{0}C
Температура ликвидус	$T_л$	Тл=1536 - 80,1*C - 5,1*Mn - 9.8*Si - 30*P - 5*Cu - 1.5*Cr - 3.5*Ni - 2*Mo - 2*V	^{0}C
Коэффициент распределения	k	0,8	Б/р
Плотность жидкой стали	ρ	7300	Кг/м^3
Полутолщина слитка	L	0,125	м
Критерий остановки	d_m	300	Б/р
Коэффициент теплоотдачи	α	140	Вт/(м ^{0}C)
Критерий остановки	ε, ε_1	0,001	Б/р
Величина разницы температур между соседними точками на поверхности слитка (условное значение для расчета максимального значения функционала)	*del*	10	^{0}C
Скорость вытягивания слитка	υ	0,8	м/мин

Поскольку, как следует из приведенного выше алгоритма, для расчета температурного поля слитка требуется определение температуры ликвидус, то важным фактором становится учет химического состава разливаемого металла, так как, влияя на температуру ликвидус, он изменяет расчетные значения температуры поверхности слитка. С другой стороны, химический состав оказывает очень сильное влияние, воздействуя на кристаллическую структуру разливаемого металла. Таким образом, возникает необходимость отдельного рассмотрения влияния химического состава металла на качество непрерывно-литой заготовки.

1. Для разработки математической модели температурного поля был использован критерий оптимальности (функционал) основанный на минимизации отклонений скорости охлаждения от среднего значения для различных элементов затвердевшего металла.
2. Разработана динамическая математическая модель, позволяющая рассчитывать температурное поле непрерывно-литого слитка на основе выбранного критерия оптимальности.

3. Разработанная модель, позволяет рассчитывать температуру поверхности слитка в зависимости от времени разливки и его длины.

Разработка нового технологического режима разливки

На основании полученной модели и алгоритма была создана программа в среде «Паскаль», позволяющая рассчитывать температурное поле слитка (температуру в поперечном сечении слитка и температуру по длине слитка) в зависимости от скорости вытягивания слитка, температуры ликвидус и температуры жидкой стали в промежуточном ковше. Для универсализации представления результатов расчета, весь сортамент, разливаемый на МНЛЗ конвертерного производства, был объединен в 3 группы в соответствии с ранжировкой, произведенной в предыдущей главе.

Первая группа сталей имеет температуру ликвидус до 1510 градусов включительно (22ГЮ, 20СП, 17Г1СУ и т.п.). Вторая группа сталей имеет температуру ликвидус от 1511 до 1520 градусов (15Г, 2СП, 3СП и т.п.) и третья группа сталей имеет температуру ликвидус от 1521 до 1530 градусов (08Ю, 08ВОСВ и т.п.).

На рисунках 7, 8 и 9 представлены результаты расчета для скорости вытягивания слитка 0,8м/мин и толщины слитка 250мм. На рисунках выделены расчетные значения для температур в точках, где были установлены пирометры в процессе проведения активного эксперимента, т.е. в конце радиального (11,4м) и в конце криволинейного участков (20,02м).

Результаты расчета для 1-ой группы

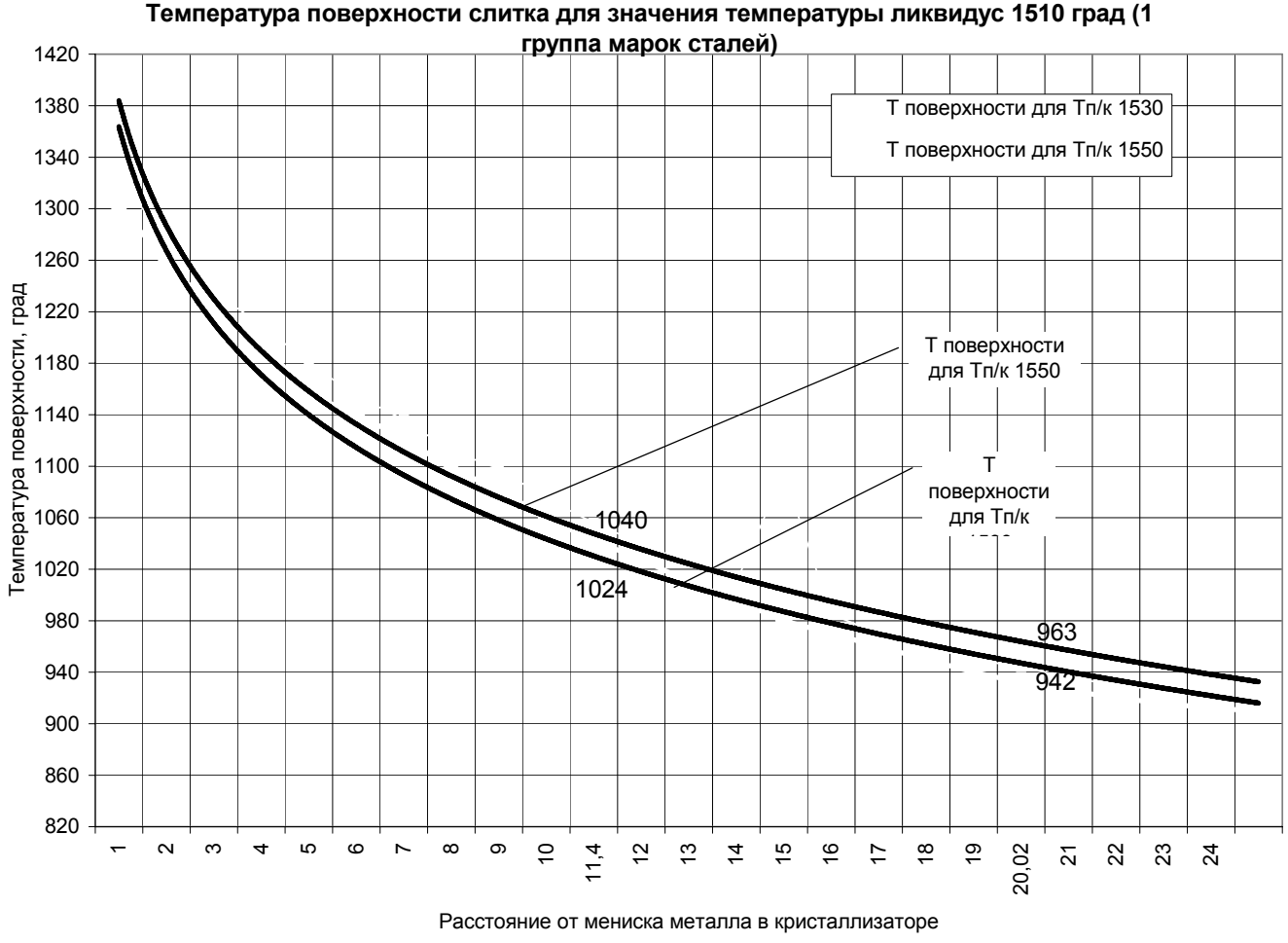


Рис. 7

Результаты расчета для 2-ой группы

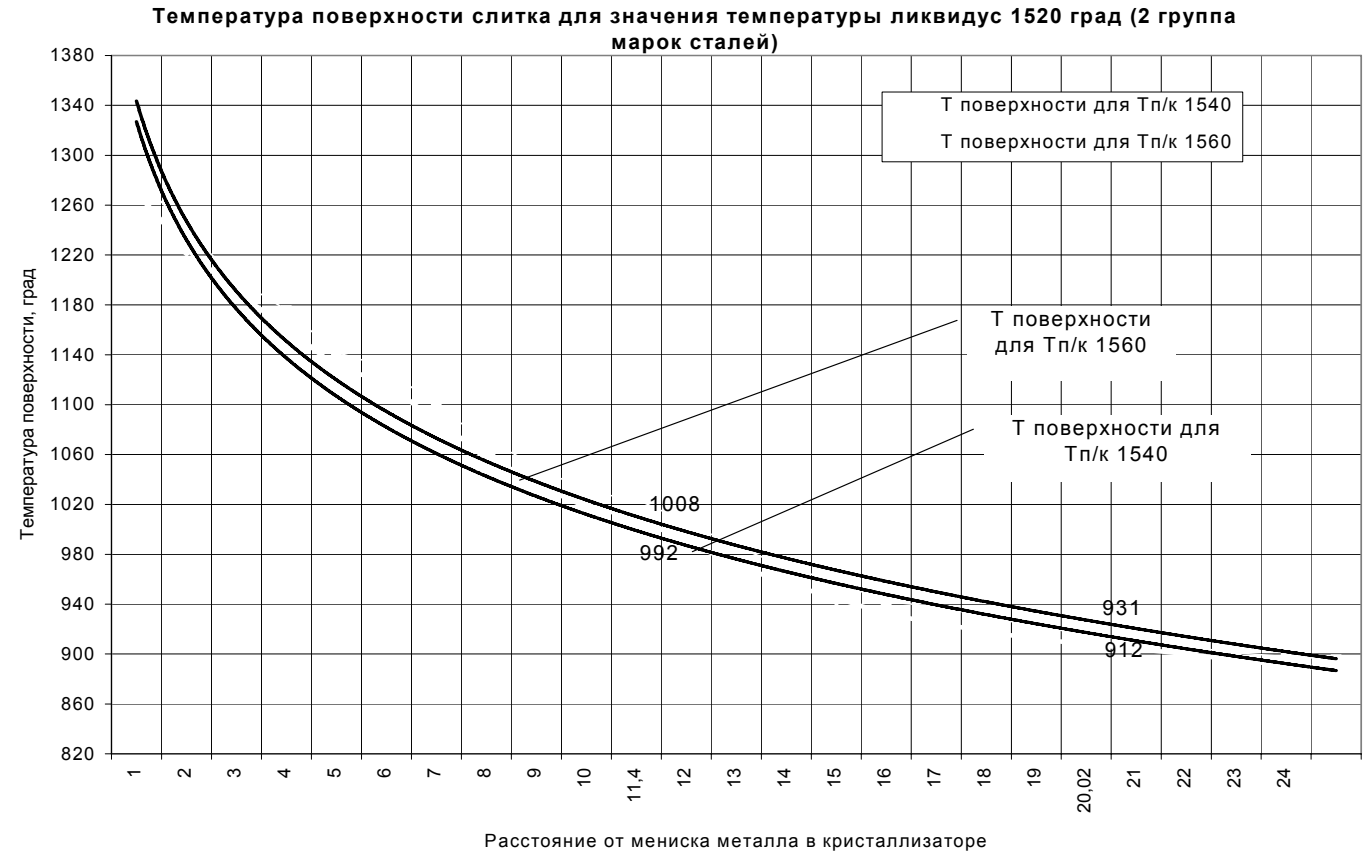


Рис. 8

Результаты расчетов для 3-й группы

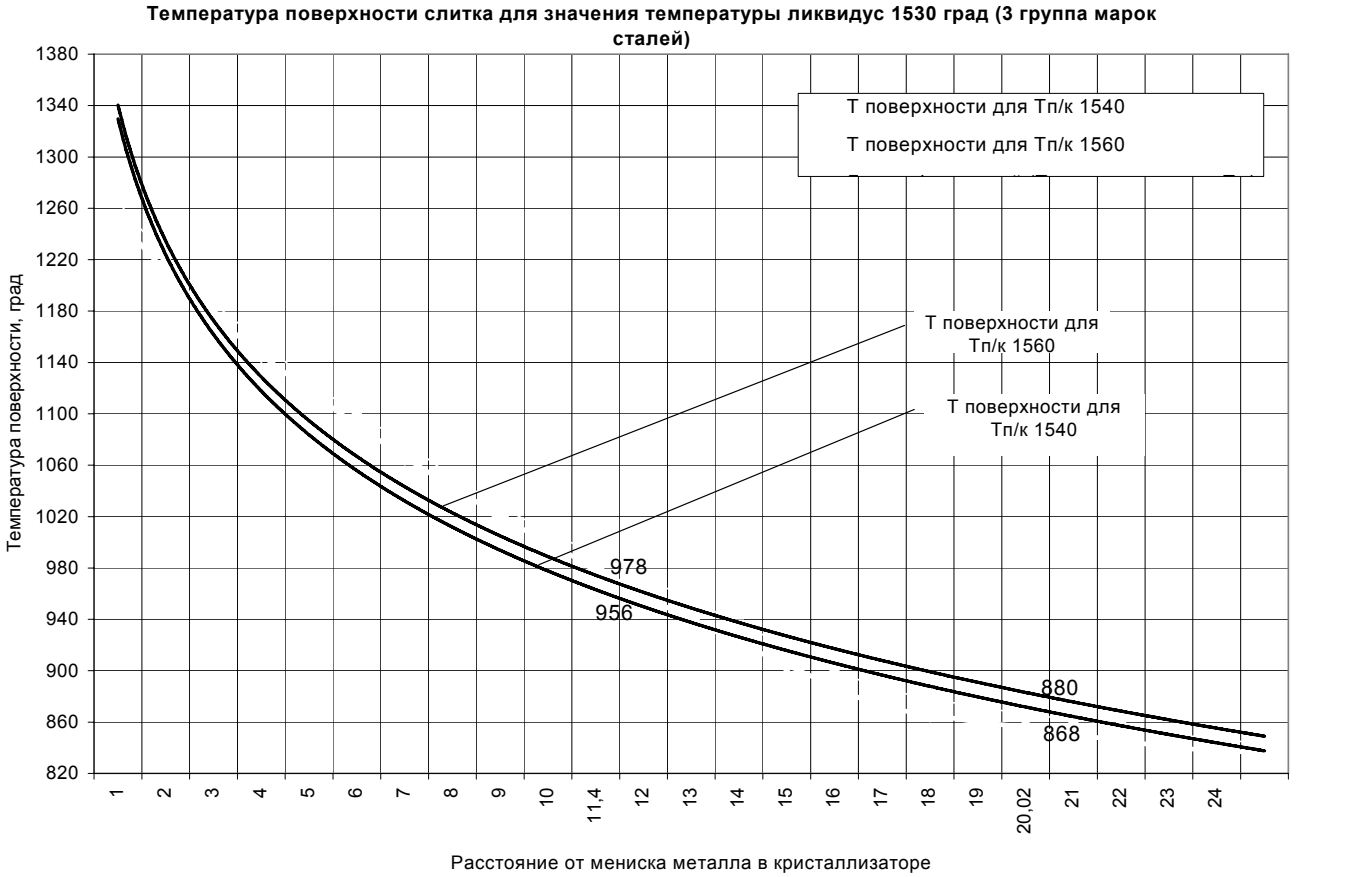


Рис. 9

Как следует из представленных выше графиков, температура поверхности слитка зависит от температуры ликвидус и температуры стали в промежуточном ковше. При этом, чем меньше температура стали в промежуточном ковше, тем ниже должна быть температура поверхности. Влияние температуры ликвидус стали на температуру поверхности непрерывного слитка имеет обратную картину, т. е. при снижении температуры ликвидус температура поверхности слитка снижается менее интенсивно.

Из расчетов, сделанных на основании разработанной модели, можно сделать ряд важных выводов:

1. Температура поверхности слитка зависит от температуры ликвидус и температуры стали в промежуточном ковше. При этом, чем меньше температура стали в промежуточном ковше, тем ниже температура поверхности.
2. Увеличение температуры ликвидус стали за счет влияния состава (снижение содержания примесей в металле) приводит при прочих равных условиях к более интенсивному охлаждению заготовки, что необходимо учитывать при разработке режимов вторичного охлаждения.

Анализ существующих режимов вторичного охлаждения

На основе созданной математической модели расчета оптимальной температуры поверхности непрерывного слитка были определены значения температуры поверхности, соответствующие режиму вторичного охлаждения, теоретически обеспечивающему минимальные термические напряжения в слитке по ходу разливки. Для проверки достоверности модели расчетные значения температур сравнивали со значениями, измеренными оптическими пирометрами. Фактические замеры температуры были получены при изучении на МНЛЗ № 1 основных факторов, оказывающих влияние на образование поверхностных и внутренних дефектов (гл.1). За основу были взяты показания пирометра полученные при проведении этого эксперимента. Кроме того, для каждого сляба вычисляли среднюю фактическую температуру поверхности по времени движения сляба в районе пирометров, которая затем сравнивалась с теоретически рассчитанным по модели значением. В результате проведенного сравнительного анализа были сделаны следующие выводы:

- Средняя фактическая температура поверхности сляба превышает расчетные значения, полученные по модели.
- Фактические расходы воды в зонах вторичного охлаждения УНРС превышают значения, регламентированные основной технологической инструкцией ТИ 105 - СТ.КК – 11 – 2000 по непрерывной разливке стали в среднем (для всех двух типов режимов охлаждения и трех типов сечений) на 60%.
- Фактические расходы воды в зоне вторичного охлаждения УНРС № 1 не обеспечивают снижение температуры поверхности сляба в соответствии с расчетными значениями (по модели), т.е. режим вторичного охлаждения не обеспечивает минимального уровня термических напряжений в корочке слитка.
- Фактические температуры поверхности больше оптимальных температур в зоне вторичного охлаждения УНРС.
- Средние отклонения фактической температуры поверхности сляба в зоне второго пирометра (20,02м) превышают отклонения от температур, рассчитанных по модели в зоне первого пирометра (11,4м).
- В зоне 3-й пятироликовой секции, 1, 2 и 11 двухроликовых секций (в радиальной зоне, начале и конце зоны разгиба) сляб подвергается дополнительным механическим напряжениям, связанным с несоответствием растворов (расстояний) между роликами большого и малого радиуса поддерживающей системы.

Разработка нового режима вторичного охлаждения

Из материалов предыдущей главы следует, что существующий режим вторичного охлаждения не обеспечивает оптимального температурного поля и, следовательно, разработка нового режима вторичного охлаждения позволит уменьшить количество дефектов поверхности и макроструктуры. Для разработки нового режима вторичного охлаждения необходимо:

- Определение основных теплотехнических и технологических параметров ЗВО: общего теплосъема, коэффициентов теплоотдачи и расходов воды по секциям.

- Установление зависимости расходов воды по зонам вторичного охлаждения от скорости разливки, марки стали и ширины разливаемого слитка.

Расчет нового режима вторичного охлаждения провели по методике, разработанной в МИСиС. Суть вышеуказанной методики заключается в том, что на основании заданного температурного поля слитка (снижение температуры поверхности по его длине) рассчитывается тепловой поток от его поверхности, а затем по связи между коэффициентом теплоотдачи и плотности орошения определяется количество охлаждающей воды для каждого участка зоны вторичного охлаждения.

Тепловые потоки от поверхности слитка, необходимые для отвода физической теплоты оболочки слитка и теплоты кристаллизации рассчитываются по следующим выражениям:

$q_{ср} = ((t_{ср1} - t_{ср2})(\delta_1 + \delta_2)*\rho*\omega*C)/(4(L_2 - L_1))$ (5)

$q_{кр} = ((\delta_2 + \delta_1)*\rho*\omega*q_к)/(L_2 - L_1)$ (6),

где $t_{ср1}$ и $t_{ср2}$ – средняя температура оболочки в начале и конце участка охлаждения, град;

δ_1 и δ_2 – толщина оболочки в начале и в конце участка охлаждения, м;

$L_2 - L_1$ – расстояние от мениска металла в кристаллизаторе на входе и выходе с участка охлаждения, м;

ω – скорость вытягивания слитка, м/мин;

С – теплоемкость затвердевшего металла, кВт/(кг*К);

Зная тепловой поток и температуру поверхности, можно определить средний коэффициент теплоотдачи α:

$\alpha = (q_{кр} + q_{ср})/ t_n$ (7),

где t_n – средняя температура поверхности в начале и конце участка охлаждения, град;

Далее определяется плотность орошения на данном участке поверхности.

Так как в теоретических расчетах очень сложно точно оценить условия охлаждения, то для определения расхода воды по длине зоны вторичного охлаждения в данной работе используем экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности орошения. Эта зависимость описываться выражением типа $\alpha = Bg + \alpha_0$, где g – плотность орошения, $м^3/м^2*ч$ а α_0 – коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией (может изменяться от 120 до 160; в качестве первого приближения принимаем величину, равной 140). В - опытный коэффициент, который может изменяться от 34 до 40 (для первоначального расчета принимаем, что этот коэффициент равняется 40).

Тогда выражение для нахождения плотности орошения имеет вид:

$g = (\alpha - \alpha_0)/B$ (8),

Расход воды на участке поверхности сляба определяется из выражения:

$Q = g*F$ (9),

где F – площадь охлаждаемой поверхности, $м^2$

Продолжительность охлаждения по узким граням:

$H = (\omega*a^2)/16k^2$ (10),

где а – толщина слитка, м

k – коэффициент кристаллизации стали, $м/мин^{0,5}$.

Результаты расчетов

Так как в предыдущей главе были выделены три группы марок сталей, которые имеют разную склонность к образованию поверхностных и внутренних дефектов, то расчеты новых режимов вторичного охлаждения производили также по группам. Однако, потребовалось учесть, что в настоящее время в цехе разливки стали конвертерного производства ОАО «Северсталь» на МНЛЗ существует два типа режимов вторичного охлаждения – для разливки низколегированного, углеродистого и среднеуглеродистого металла (мягкий) и для низкоуглеродистого металла (жесткий). Поэтому было принято решение объединить режим для 1-ой и 2-ой групп (низколегированный, углеродистый и среднеуглеродистый металл) и сделать расчет новых режимов для двух типов охлаждения, аналогично существующему на ОАО «Северсталь». При этом новый мягкий режим будет включать в себя две группы сталей - 1-я группа: углеродистые, низколегированные (температура ликвидус не более 1510^0С) и 2-я группа: среднеуглеродистые (температура ликвидус от 1511 до 1520^0С). А жесткий режим

вторичного охлаждения одну группу – 3-я группа: низкоуглеродистые стали (температура ликвидус от 1521 до 1530^0C).

Полученные новые режимы вторичного охлаждения, прежде всего, должны обеспечивать заданные температурные поля, полученные в предыдущей главе (рисунки 8, 9, 10). Поэтому, после выполнения всех расчетов новых режимов был проведен повторный эксперимент по контролю фактического температурного поля слитка, а также для более точной настройки значений численных коэффициентов. В процессе проведения повторного эксперимента на МНЛЗ № 1 на 2-ом ручье использовали новый режим вторичного охлаждения, а на 1-м ручье система работала в прежнем режиме. Выборочно, плавки разлитые на МНЛЗ № 1 подвергались контролю качества поверхности и макроструктуры по методике, использованной в предыдущем эксперименте, для сравнения работы двух разных вариантов работы вторичного охлаждения (прежний и новый расчетный режим вторичного охлаждения).

Проанализировав результаты эксперимента по использованию нового режима вторичного охлаждения, можно сказать, что данный режим не обеспечил требуемых расчетных значений температуры поверхности слитка на нижнем участке роликового полотна в зоне разгиба. По результатам повторного эксперимента стало ясно, что в зоне разгиба происходит незначительное переохлаждение слитка на 20 – 40 градусов, что, естественно, приводит к ухудшению условий затвердевания слитка в этой зоне.

Всего для опробования нового режима на МНЛЗ № 1 было разлито 52 плавки пятью сериями плавок. В период проведения эксперимента на МНЛЗ были разлиты марки стали из всех трех групп (1-я группа: углеродистый и низколегированный металл; 2-я группа: среднеуглеродистый металл; 3-я группа: низкоуглеродистый металл). Согласно полученным результатам, можно сделать несколько выводов, о влиянии нового режима вторичного охлаждения на качество поверхности и макроструктуры непрерывно литых заготовок:

1. Общее количество поверхностных трещин сократилось на 47% по сравнению со слябами, при разливке которых использовался прежний режим вторичного охлаждения, т. е. разлитых на ручье № 1.
2. Уровень сетчатых трещин снижен в 1,5 раза по сравнению с прежним режимом вторичного охлаждения, используемом на ручье № 1.
3. Средний уровень внутренних трещин (осевые, перпендикулярные граням, гнездообразные) сократился в среднем на 0,5 балла).
4. Результаты фактического измерения температуры поверхности сляба на 2-м ручье говорят о том, что в зоне разгиба происходит незначительное переохлаждение слитка на 20 – 40 градусов, что, не позволяет снизить до минимума уровень термических напряжений в самой опасной зоне (с точки зрения образования трещин) поддерживающей системы. Следовательно, необходимо произвести корректировку режима вторичного охлаждения слитка в 8 и 9 зонах вторичного охлаждения, с целью максимального приближения температуры поверхности к расчетным значениям.

Корректировка нового режима вторичного охлаждения

Как показали результаты измерения фактической температуры поверхности слитка при проведении повторного эксперимента температура поверхности в среднем на 30 градусов ниже расчетных значений. Поэтому основной задачей корректировки расходов воды в 8 и 9 зонах следует считать уменьшение расхода воды, которое бы обеспечило повышение температуры поверхности на 30 градусов, по сравнению с предыдущим режимом.

Для получения требуемого результата нам необходимо решить обратную задачу, т.е. по заданному значению температуры слитка в 8 и 9 зонах определить плотность орошения, и затем рассчитать расход воды на эти зоны.

В данной работе для определения расхода воды по длине зоны вторичного охлаждения использовалась экспериментальная зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения. Эта зависимость имеет вид $g = (\alpha - \alpha_0)/B$, где g – плотность орошения, $м^3/м^2*ч$ а α_0 – коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией. Для первоначального расчета мы принимали этот коэффициент равным 140, а B - опытный коэффициент, значение которого было принято равным 40.

Как показали результаты повторного эксперимента, температура поверхности слитка в 8 и 9 зонах МНЛЗ в среднем на 30^0С ниже рассчитанных по модели значений. Следовательно, для обеспечения заданных значений температуры, необходимо искусственно поднять температуру поверхности слитка на 30^0С в последних секциях зоны вторичного охлаждения (8 и 9 зоны) и определить значения экспериментального коэффициента В по соотношению (8), который будет обеспечивать при расчетах нужную плотность орошения для исследуемой МНЛЗ.

Данные для уточненного расчета экспериментального коэффициента В:

Мягкий режим вторичного охлаждения для 1,2-ой группы (углеродистые, низколегированные и среднеуглеродистые стали; температура ликвидус не более 1520^0С)

Таблица 8

		Расстояние, м	**Температура рассчитанная по модели, ^{0}С**	**Температура рассчитанная по модели + 30^0С, ^{0}С**	**Значение экспериментального коэффициента В**
8 зона	Вход	12,59	1028	1058	42,5
	Выход	13,82	1016	1046	
9 зона	Вход	14,23	1014	1044	42
	Выход	15,49	1006	1036	

Среднее значение коэффициента В, принимаемое для уточненного расчета мягкого режима 42,3.

Жесткий режим вторичного охлаждения для 3-й группы (низкоуглеродистые стали; температура ликвидус от 1521 до 1530^0С)

Таблица 9

		Расстояние, м	**Температура рассчитанная по модели, ^{0}С**	**Температура рассчитанная по модели + 30^0С, ^{0}С**	**Значение экспериментального коэффициента В**
8 зона	Вход	12,59	951	981	41,3
	Выход	13,82	936	966	
9 зона	Вход	14,23	933	963	41,1
	Выход	15,49	921	951	

Среднее значение коэффициента В, принимаемое для уточненного расчета жесткого режима 41,2.

Корректировку режима вторичного охлаждения производили только для скорости разливки выше 0,6 м/мин и, т.е. для рабочего диапазона скоростей разливки.

После повторного перерасчета уточненный режим вторичного охлаждения был опробован на двух сериях плавок на МНЛЗ № 1 по той же схеме, что и в предыдущем эксперименте (ручей № 1 – старые режимы вторичного охлаждения; ручей № 2 – уточненные режимы вторичного охлаждения).

При проведении последнего эксперимента все плавки, разлитые с применением экспериментальных режимов подвергались контролю качества поверхности и макроструктуры по методике, описанной выше.

Анализ отклонений фактических температур поверхности сляба от расчетных значений (по модели) после внесения изменений в расход воды в 8 и 9-ой зонах вторичного охлаждения свидетельствует, что в результате корректировки произошло повышение температуры поверхности в среднем на 20^0С в конце зоны разгиба.

Результаты разливки двух экспериментальных серий плавок с применением уточненных режимов вторичного охлаждения представлены в таблицах 10, 11.

Результаты контроля качества поверхности слябов, разлитых с использованием уточненного режима вторичного охлаждения

Таблица 10

№ серии	**Количество плавок**	**Прежний (контрольный) режим (1 ручей)**	**Новый режим (2 ручей)**

	в серии	% слябов с продольными трещинами	% слябов с поперечными трещинами	% слябов с сетчатыми трещинами	% слябов с ребровыми трещинами	% слябов с паукообразными трещинами	% слябов с поверхностными трещинами	% слябов с продольными трещинами	% слябов с поперечными трещинами	% слябов с сетчатыми трещинами	% слябов с ребровыми трещинами	% слябов с паукообразными трещинами	% слябов с поверхностными трещинами
1	12	1,2	4,4	3,8	0	0	9,4	0,8	1,2	0,8	0	0	2,8
2	5	2,3	2,4	4,2	0,6	0,2	9,7	1,8	0,2	2,3	0	0,4	4,7
Среднее по сериям	8,5	1,8	3,4	4	0,3	0,1	9,6	1,3	0,7	1,5	0	0,2	3,7

Результаты контроля качества макроструктуры слябов, разлитых с использованием уточненного режима вторичного охлаждения

Таблица 11

№ серии	Количество плавок в серии	Прежний (контрольный) режим (1 ручей)						Новый режим (2 ручей)					
		Осевая рыхлость	Осевая химическая неоднородность	Осевая трещина	Трещины перпендикулярные граням	Гнездообразные трещины	Точечная неоднородность	Осевая рыхлость	Осевая химическая неоднородность	Осевая трещина	Трещины перпендикулярные граням	Гнездообразные трещины	Точечная неоднородность
1	12	1	1,5	0,5	1,5	0,5	1	0,5	1	0,5	1,5	0	1,5
2	5	1,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1	1,0	1,5	0,5	0,5	0	1
Среднее	8,5	1,3	1	0,5	1,5	0,5	1	0,8	1,3	0,5	1	0	1,3

Разливаемые в период проведения эксперимента марки стали: S1006, St37, 08ПС, 3СП, 20СП, 22ГЮ.

Таким образом:

1. Количество поверхностных трещин сократилось в 2,6 раза по сравнению со слябами, при разливке которых использовался прежний режим вторичного охлаждения, т. е. разлитых на ручье № 1.
2. Средний уровень внутренних трещин (осевые, перпендикулярные граням, гнездообразные) сократился в среднем на 0,5 балла).
3. Уточненный режим вторичного охлаждения (снижение расходов воды в 8 и 9 зонах) позволяет максимально приблизить фактическую температуру поверхности слитка к расчетным значениям для данной группы металла.

Подтверждение результатов исследований

Как подтверждают результаты исследований, выполненных в настоящей работе, вопрос улучшения качества непрерывно-литых заготовок является комплексным. А именно, сочетание управления композиционным составом стали и режимами вторичного охлаждения слитка.

Для оценки эффективности всего комплекса предложений, выдвинутых в этой работе, было исследовано качество стали 06ГФБАА, разлитой с применением разработанного режима вторичного охлаждения. Поскольку по содержанию вредных примесей (табл. 12) эта сталь принадлежит к группе с низкой потенциальной вероятностью образования трещин, то уровень дефектов на поверхности металла предположительно должен быть ниже обычного уровня.

Композиционный химический состав стали 06ГФБАА:

Таблица 12

C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Nb	V	Al
			Не более						
0,04-0,07	1,35-1,60	0,15-0,35	0,10	0,10	0,005	0,005	0,04-0,06	0,05-0,08	0,020-0,040

Cu	As	Sn	Sb	N	Ti	Ca	Сэ
не более							
0,05	0,005	0,005	0,005	0,007	0,025	0,005	0,39

По вышеприведенной методике на МНЛЗ № 1 конвертерного производства было отлито и исследовано 12 плавок (193 сляба) металла 06ГФБАА.

Сравнительные данные по качеству металла 06ГФБАА и других марок сталей, разливаемых на МНЛЗ конвертерного производства

Таблица 13

Марка стали	Средний балл гнездообразных трещин, балл	Средний балл сетчатых трещин, балл
06ГФБАА	0,15	1,3
08Ю	0,48	2,5
13Г1СУ	0,78	8,9
17Г1СУ	1,2	9,2
20СП	0,86	10,4
22ГЮ	0,80	5,6

Уровень поверхностных и внутренних дефектов выявленный на слябах оказался минимальным по сравнению с уровнем дефектов на остальном металле.

Таким образом, полученные результаты, позволяют нам сделать вывод о правильности предположений, выдвинутых в настоящей работе. Т.е. вопрос управления качеством непрерывно-литой заготовки является комплексным и максимальных результатов в данном вопросе можно достичь только в случае управления режимами вторичного охлаждения МНЛЗ и содержанием примесей в готовом металле.

1. Результаты контроля качества непрерывно литых слябов, разлитых с применением нового режима вторичного охлаждения, рассчитанном на основании модели изменения температурного поля слитка, позволяют нам говорить о максимальном приближении данной зависимости к оптимальному варианту. Однако нельзя утверждать, что в работе было найдено оптимальное решение, так как в работе не проверялись теоретические вопросы оптимизации (существование, единственность и устойчивость).
2. По данным о фактическом измерении температуры поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ показана необходимость применения разных значений экспериментального коэффициента В, используемого в зависимости плотности орошения слитка от коэффициента теплоотдачи для последних зон вторичного охлаждения. Показана необходимость увеличения значения экспериментального коэффициента В от 40 до 42,3 к концу зоны вторичного охлаждения. Сделан уточненный расчет расходов воды в последних зонах вторичного охлаждения МНЛЗ по предлагаемому коэффициенту В.
3. Результаты контроля качества слябов подтверждают правильность корректировки уточненного режима вторичного охлаждения. Количество поверхностных трещин в результате применения уточненного режима сократилось в 2,7 раза по сравнению с прежними режимами вторичного охлаждения. Средний уровень внутренних трещин (осевые, перпендикулярные граням и гнездообразные) снизился на 0,5 балла.
4. В результате проведения эксперимента по изучению нового режима вторичного охлаждению было отмечено положительное влияние этого режима на работу форсунок вторичного охлаждения. В результате наблюдения за работой форсунок была отмечена их стабильная работа на всех скоростях разливки. Форсунки давали постоянный хорошо организованный факел. В то время как на прежних режимах (особенно на мягком режиме вторичного охлаждения) отмечалась не стабильная работа форсунок водо-воздушного охлаждения, т. е. форсунка работала с перебоями.

Такое явление возникало, в следствии, низких расходов воды в нижних зонах ЗВО, когда воды идущей на зону не хватало на все форсунки (вода постоянно перераспределялась по форсункам). А увеличение расхода воды на новых режимах позволило убрать данное явление и повысить эффективность работы вторичного охлаждения.

Выводы:

1. Разработана и опробована методика сбора и обработки массивов технологической информации, позволяющая выявить ее влияние на образование дефектов непрерывно-литых заготовок, основанная на сочетании методов парной и множественной корреляции.
2. Создана база технологических данных для исследования влияния различных технологических параметров разливки на качество поверхности и макроструктуры непрерывно-литых слябов широких сечений (от 1000 до 1850 мм).
3. На основе статистической обработки данных –
   - Подтверждено, что основными химическими элементами, влияющими на пораженность непрерывно-литых слябов поверхностными и внутренними дефектами, являются: ***углерод, марганец, фосфор, сера***.
   - Выявлены три группы составов сталей, ранжированные по степени склонности к образованию ***внутренних трещин (по возрастанию):***
     1-я группа (углерод от 0.0 до 0,08%; марганец от 1,21% и выше; сера и фосфор от 0.0 до 0,01%);
     2-я группа (углерод от 0,081 до 0,18%; марганец от 0,81% до 1,2%; сера и фосфор от 0,011 до 0,02%);
     3-я группа (углерод свыше 0,181%; марганец от 0,2% до 0,8%; сера и фосфор свыше 0,021%)
   - Выявлены три группы составов сталей, ранжированные по степени склонности к образованию ***поверхностных трещин (по возрастанию):***
     1-я группа (углерод от 0.0 до 0,06%; марганец свыше 1,21%; сера и фосфор от 0 до 0,01%);
     2-я группа (углерод от 0,061 до 0,16%; марганец от 0,81% до 1,2%; сера и фосфор от 0,011 до 0,02%);
     3-я группа (углерод свыше 0,161%; марганец от 0,2% до 0,8% сера и фосфор свыше 0,021%).
   - Установлено, что основными факторами, оказывающими влияние на **качество макроструктуры слябов** при традиционной технологии непрерывной разливки на МНЛЗ радиально-криволинейного типа, являются скорость вытягивания слитка и расстояния между роликами большого и малого радиусов поддерживающей системы.
   - Выявлены основные факторы, связанные с качеством поверхности непрерывного слитка - организация теплоотвода в зоне вторичного охлаждения и температура стали в промежуточном ковше.
4. Разработана и адаптирована по фактическим данным динамическая математическая модель, позволяющая рассчитывать температурное поле непрерывно-литого слитка, в частности температуру его поверхности, в зависимости от времени разливки.
5. На основании расчетов определен режим вторичного охлаждения, характеризующийся увеличенными расходами (по секциям) и более плавным распределением охлаждающего агента (воды) по поверхности непрерывного слитка, позволяющий минимизировать термические напряжения в непрерывном слитке.
6. Фактическими данными о температуре поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ показана необходимость применения разных значений экспериментального коэффициента В (в зависимости плотности орошения от коэффициента теплоотдачи) в начальных и последних секциях зоны вторичного охлаждения. Произведена количественная оценка величины необходимого увеличения значения коэффициента на 4% к концу зоны вторичного охлаждения.

Выполнен уточненный расчет расходов воды в последних зонах вторичного охлаждения МНЛЗ с учетом скорректированного экспериментального коэффициента B.

7. Практическое опробование нового режима вторичного охлаждению подтвердило его положительное влияние на работу форсунок вторичного охлаждения, в частности была отмечена их более стабильная работа на всех скоростях разливки.
8. Результаты контроля качества непрерывно литых слябов (по уровню дефектов поверхности (продольных, поперечных, сетчатых и ребровых трещин) и макростурктуры (гнездообразных трещин)), полученных с использованием предложенного режима вторичного охлаждения, рассчитанного по разработанной модели, позволяют судить о максимальном приближении данной зависимости к оптимальному варианту с точки зрения сочетания максимально возможных скоростей кристаллизации с минимизацией термических напряжений в корочке слитка.
9. Применение совокупности разработанных мероприятий в промышленных условиях (Конвертерное производство ОАО «Северсталь») на плавках металла, имеющего оптимальный химический состав с точки зрения склонности металла к образованию дефектов (06ГФБАА), при использовании усовершенствованного режима вторичного охлаждения позволило снизить:
   - количество поверхностных трещин в 2,7 раза;
   - уровень внутренних дефектов (трещины осевые, перпендикулярные граням и гнездообразные) на 0,5 балла.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Мищенко И.О., Дуб А.В., Материалы научно-технической конференции, посвященной памяти В. И. Явойского, 2001 г.
2. Мищенко И.О., Материалы научно-технической конференции «Северсталь – пути к совершенствованию», «Определение состояния УНРС конвертерного производства ОАО «Северсталь» по макроструктуре непрерывно-литых слябов», 2001 г.
3. Мищенко И.О., Дуб А.В., Макарычева Е.В., А.М.Ламухин, В.Г.Ордин, Загорулько, Лятин А.Б., «Влияние технологических факторов на качество непрерывно литых стальных заготовок», Известие ВУЗов «Черная металлургия»; Выпуск 1, 2006 г. – с.19 – 22.
4. Мищенко И.О., Дуб А.В., Макарычева Е.В., А.М.Ламухин, В.Г.Ордин, «Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывно-литого слитка», Известие ВУЗов «Черная металлургия»; Выпуск 3, 2006 г. – с. 15 – 21.