

Конечным итогом проведенного исследования является разработанная технология производства высокоточного сортового проката номинальным диаметром 22 мм. Также полученные результаты исследования являются основой для проведения дальнейшего изучения межклетевой деформации на других профилях с последующим экспериментальным прокатом.

Выводы

Теоретический анализ с помощью методов математического моделирования позволяет изучать напряженно-деформированное состояние, температурные условия производства и структурировать производственные процессы и является неотъемлемой частью современного предприятия. Особую роль, на сегодняшний день, занимает математическое моделирование методом конечных элементов. МЭК является наиболее универсальным методом математического анализа задач ОМД. Результаты конечно-элементного анализа дают возможность получать зависимости, позволяющие управлять и совершенствовать производство, а также создавать новые технологические процессы.

Список литературы

1. Оборов М.В., Панковец И.А., Верещагин М.Н., Астапенко И.В. Численное моделирование процесса прокатки трубы D 88,9×8 на редуционно-растяжном стане трубопрокатного агрегата ТПА 21/168 ОАО «БМЗ - управляющая компания холдинга «БМК». «ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации.» 2016;(3):82-86.
2. Панковец И.А. Разработка и внедрение автоматизированной системы оптимального раскрыя прутка на стане 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». «Литье и металлургия». 2019;(4):38-42.
3. Панковец И.А., Верещагин М.Н. Исследование влияния стресс-факторов на качество поверхности прутка при прокатке в черновой группе клетей. «СТАЛЬ». 2022; (8):14-23
4. Панковец И.А., Оборов М.В., Ходосовская Н.А., Верещагин М.Н. Совершенствование калибровки валков мелкосортно-проволочного стана 370/150 для обеспечения точности профиля проката. «ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации». 2020;76(11):1119-1127.

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВЫХ МАРОК СТАЛИ В ОАО «БМЗ - УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК»

Писаренко И.О., Пивцаев И.В., Путеев В.С., Шатило В.А.

ОАО «БМЗ - управляющая компания холдингом «БМК», г. Жлобин

Аннотация. Производство рельсовых марок стали подразумевает получение чистого высокотехнологичного продукта, как по вредным примесям химического состава — серы, фосфора и других элементов, так и по содержанию и размеру неметаллических включений. Технология включает в себя подготовку и пропорциональный ввод шихтовых и легирующих материалов на определенных стадиях производства. Так, при выплавке стали в ДСП применяется «чистая» шихта и углеродистый лом в процентном соотношении 65/35. В свою очередь, с целью недопущения образования эндогенных корундовых включений, при внепечной обработке применяются кордовые углеродсодержащие и шлакообразующие материалы. С целью исключения наличия экзогенных многосоставных неметаллических включений при разливке стали применяется периклазоуглеродистая металлопроводка. В настоящий момент в ОАО «БМЗ - управляющая компания холдинга «БМК» (далее – предприятие) разработана и внедрена опытная технология производства непрерывнолитой заготовки (блюм) прямоугольного сечения 300×400 мм (далее НЛЗ) рельсовых марок стали. Первая опытная плавка обеспечила более 80 % выхода годного для аттестации рельс специального назначения и порядка 20 % выхода годного для аттестации рельс общего назначения. В период с января по август 2023 года на предприятии произведено и отгружено в адрес потребителя более 27

тыс. тонн рельсовой продукции. С целью обеспечения требований микроструктуры рельс и исключения в них внутренних дефектов предприятие проводит работу по повышению качества макроструктуры НЛЗ для последующего переката в рельсы. Таким образом, проанализировано влияние режимов электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе, режимов вторичного охлаждения на образование дефектов макроструктуры слитка, таких как «осевая ликвация» и «центральная пористость»; произведен расчет оптимального скоростного режима разливки. Разработаны оптимальные режимы работы системы «мягкого» обжатия слитка.

Ключевые слова: непрерывно литая заготовка (блум), непрерывная разливка стали, катушки электромагнитного перемешивания, вторичное охлаждение, система «мягкого» обжатия слитка, макроструктура, столбчатая и равноосная кристаллическая структура, центральная пористость, осевая ликвация.

В настоящее время железнодорожный транспорт является эффективным и экономически целесообразным способом транспортировки большого количества пассажиров и грузов на дальние расстояния. Безопасность движения поездов обеспечивается повышенным качеством эксплуатируемых рельс, которое регламентируется КР СТ 2432-2013. Качество изготовленных рельс в большей степени определяется качеством исходной непрерывнолитой заготовки. Требования к макроструктуре в соответствии с Техническим соглашением между производителем НЛЗ и изготовителем рельсов, а также фактические результаты на первоначальном этапе производства представлены в таблице 1.

В соответствии с данными таблицы 1 при оценке макроструктуры НЛЗ сечением разливки 300×400 мм сталей марок R350HT, Э76Ф отмечено ряд отклонений по баллам ЦП и ОЛ. На рисунке 1 представлена макроструктура продольных сечений первых серий плавок производства рельсовых марок сталей.

Развитие столбчатой структуры на всех поперечных и продольных темплетах достигает до 85 мм, имеет тонкое строение. Осевая пористость в продольном сечении представляет собой группы раковин в виде цепочек, длина вытянутых раковин не превышает 10 мм. Осевая ликвация представляет собой сочетание шнурового и V-образного характера. Основными причинами выявленных дефектов является слабо развитая равноосная зона слитка, при которой отсутствует подпитка затвердевшей зоны жидкой фазой [1]. На протяженность той или иной зоны влияет целый ряд факторов, к которым можно отнести химический состав кристаллизующегося металла, его газонасыщенность, температуру и скорость разливки металла, протяженность зоны двухфазного состояния, продолжительность затвердевания и другие факторы. Из этих факторов зона двухфазного состояния при затвердевании сплавов оказывает наибольшее влияние на качество отливаемых слитков, определяя степень развития ликвационных явлений, плотность осевой зоны [2].

Таблица 1. Результаты макроструктуры опытных партий рельсовых марок сталей

Марки стали	Центральная пористость (ЦП), балл	Осевая ликвация (ОЛ), балл	Ликвационные полосы и трещины по сечению (ЛПТс), балл	Ликвационные полосы и трещины осевые (ЛПТосев), балл	Ликвационные полосы и трещины угловые (ЛПТу), балл	Светлая полоса (контур) (СП), балл	Краевое точечное загрязнение (КТЗ), балл
R350HT, Э76Ф	2,0	1,5	0	0	0	0	1,0
	2,0	1,5	0	0	0	0	0,5
	4,0	1,5	0	0	0	0	0,5
	2,0	1,5	0	0	0	0	0,5
	2,0	2,5	0	0	0	0	0,5
	1,0	1,0	0	0	0	0	0,5

	3,0	2,5	0	0	0	0	0
	1,0	2,5	0	0	0	0	1,0
	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0
Требования Технического соглашения	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0

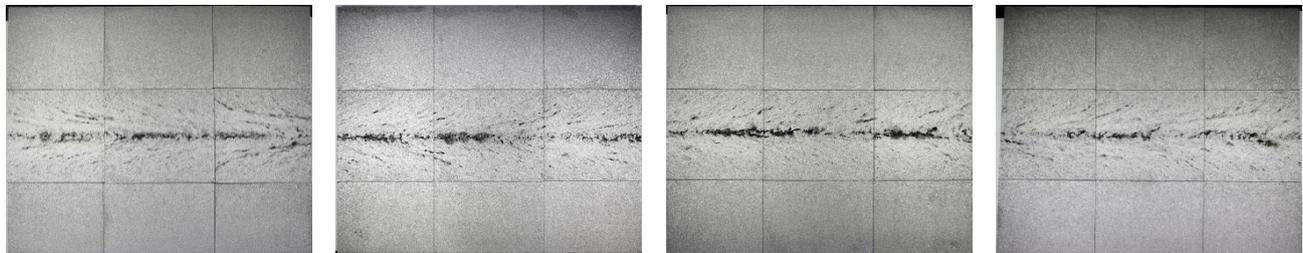


Рисунок 1. Макроструктура продольного сечения заготовок сечением 300×400 мм рельсовых марок сталей

Для улучшения качества макроструктуры блюмов рельсовых марок стали был разработан комплекс мероприятий, включающий в себя разработку оптимальных параметров работы катушек электромагнитного перемешивания, скоростного режима разливки, расчета параметров вторичного охлаждения блюмов. Также при производстве рельсовых марок была задействована система «мягкого» обжатия слитка. Электромагнитное перемешивание (далее – ЭМП) жидкой фазы непрерывнолитой заготовки является одним из наиболее эффективных методов физического воздействия на кристаллизирующийся слиток. Под воздействием динамических нагрузок часть вершин дендритов механически обламывается и осколки твердой фазы попадают в жидкую ванну, где постепенно оседают в зумпфовую зону. Наличие частиц твердой фазы перед фронтом затвердевания в зоне роста столбчатых кристаллов, в свою очередь, при определенных условиях способствует ускорению перехода от зоны столбчатых к зоне равноосных кристаллов. Перемешивание осуществляется с помощью индуктора, в котором создается вращающееся магнитное поле.

Проникая сквозь оболочку слитка, магнитное поле индуцирует в жидком металле вихревые токи. Под воздействием электромагнитных сил металл начинает перемещаться. Изменяя параметры тока, подаваемого на индуктор, можно регулировать скорость перемещения металла. В результате перемешивания в жидкой сердцевине слитка происходит выравнивание температуры, быстрее снимается перегрев, расплав обогащается активными центрами кристаллизации в виде обломков и оплавившихся ветвей дендритов [2]. Однако при большой подводимой мощности и высокой интенсивности перемешивания расплава есть риск получения обедненных углеродом участков.

Подбор оптимальных режимов катушек ЭМП при производстве рельсовых марок сталей производили на разных ручьях в пределах серии плавов, чтобы оценить эффект перемешивания расплава с разной интенсивностью перемешивания при одинаковых условиях разливки, таких как перегрев жидкой стали и скорость вытягивания. Результаты оценки макроструктуры в зависимости от изменения силы тока на катушках ЭМП представлены на диаграмме 1.

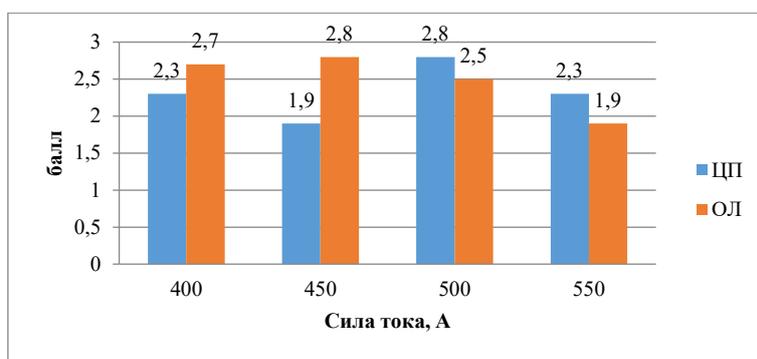


Рисунок 2. Распределение дефектов типа «осевая ликвация» и «центральная пористость» в зависимости от интенсивности перемешивания расплава в кристаллизаторе

В соответствии с рисунком 2, очевидно, что, увеличивая интенсивность перемешивания расплава в кристаллизаторе, получаем более рассеянную центральную пористость, но менее грубую осевую V-образную ликвацию. Обязательным условием получения плотной осевой зоны НЛЗ является соблюдение соотношения [3]

$$\frac{L_{ж}}{L_{м}} \leq 0,9 \quad (1)$$

где $L_{м}$ – металлургическая длина МНЛЗ (расстояние по оси заготовки от уровня жидкого металла в кристаллизаторе до последнего ролика), м.

$L_{ж}$ – максимальная протяженность жидкой фазы на МНЛЗ, которая высчитывается по формуле [3]:

a – толщина наиболее толстой заготовки, отливаемой на МНЛЗ, м.

В соответствии с произведенными расчетами $L_{ж}$ для сечения разливки 300×400 мм составило 24,48 м. Таким образом, условие получения плотной осевой зоны НЛЗ при скорости разливки, равной 0,6 м/мин выполняется. Расчет вторичного охлаждения заготовки производили по зонам в соответствии с конструкцией МНЛЗ при рабочей скорости вытягивания, равной 0,6 м/мин. Для получения непрерывнолитой заготовки с ограниченной зоной столбчатых дендритов, развитой зоной равноосных кристаллов с рассредоточенной осевой пористостью и осевой ликвацией целесообразно увеличивать протяженность зоны двухфазного состояния путем снижения интенсивности охлаждения, минимизации температурных градиентов между контурами охлаждения НЛЗ. Расширение зоны твердожидкого состояния увеличивает число активных частиц, способных выполнять роль зародышей новых кристаллов. Для чего, при разработке модели вторичного охлаждения рельсовых марок сталей было предложено снизить интенсивность охлаждения в зоне подбоя с целью снижения разности температур на выходе из кристаллизатора и обеспечить плавное снижение температуры поверхности слитка. Расчетные значения расходов воды по контурам представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расходы воды по зонам вторичного охлаждения

Расход воды л/мин	Скорость м/мин					
	0	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75
Контур 1 (боковые)	5	5	9	12	16	22
Контур 2 (радиальные)	5	5	6	9	12	16
масса в мин.	0	144,3	288,6	432,9	577,2	721,5
л/кг ст.	0	0,0693	0,052	0,0485	0,0485	0,0527
Кол-во воды на 1 ф-ку	1,25	1,25	1,88	2,63	3,5	4,75
Контур 3 (боковые)	5	5	12	18	22	31
Контур 4 (радиальные)	5	5	9	13	18	25
масса в мин.	0	144,3	288,6	432,9	577,2	721,5
л/кг ст.	0	0,0693	0,0728	0,0716	0,0693	0,0776

Кол-во воды на 1 ф-ку	0,25	0,25	0,53	0,78	1	1,4
Контур 5 (боковые)	7	7	9	10	10	12
Контур 6 (радиальные)	5	5	6	7	8	9
масса в мин.	0	144,3	288,6	432,9	577,2	721,5
л/кг ст.	0	0,0832	0,052	0,0393	0,0312	0,0291
Кол-во воды на 1 ф-ку	0,43	0,43	0,54	0,61	0,64	0,75
Расч.расход л/кг		0,2218	0,1767	0,1594	0,149	0,1594
Общий	32	32	51	69	86	115
Расход л/кг		0,36	0,27	0,23	0,19	0,17

В совокупности с разработанной моделью вторичного охлаждения для подавления осевой сегрегации слитка было решено применение существующей системы «мягкого» обжата слитка. Устройство мягкого обжата воздействует на непрерывный слиток путем надавливания роликами на твердую корочку, что приводит к деформированию твердой корочки и сжатию двухфазной зоны, имеющей «нулевую» прочность. Полезный эффект производит та часть деформации, которая приводит к сжатию двухфазной зоны. При сжатии двухфазной зоны частично компенсируется усадочный процесс, что приводит к увеличению гидродинамического давления расплава. Задача «мягкого обжата» заключается в сближении фронтов кристаллизации двухфазной твердожидкой зоны в конце затвердевания, чем обеспечивается бесперебойное питание кристаллизующегося металла и осуществляется подавление порообразования. При мягком обжатии успешно происходит разрушение междендритных перемычек, формирующихся в конической осевой зоне затвердевающей жидкой стали.

Разрушенные дендриты, плавающие в квазиравновесной двухфазной зоне, выступают в роли центров кристаллизации на заключительной стадии кристаллизации. Тем самым предотвращается формирование «мини-слитков», приводящих к макросегрегации вдоль оси ручья. При регулировании процесса в режиме «онлайн» с помощью модели «Danieli-DDSR» производят динамический расчет температурного профиля и фактической доли твердой фракции в осевой зоне блюма. По результатам расчета формируется таблица таких установочных величин межвалковых зазоров в каждом блоке тянущих роликов, которые обеспечат режим мягкого обжата в соответствии с заданной схемой деформации, наиболее подходящей для данной марки стали. Это гарантирует приложение необходимых усилий в каждом блоке роликов с максимальной точностью и предотвращает возникновение внутренних трещин. Полностью автоматизированная система управления позволяет контролировать осевую сегрегацию без прямого участия оператора. В соответствии с фактическим термическим конусом, рассчитанным системой (рисунок 3) были произведены расчеты параметров системы «мягкого» обжата (таблица 3).

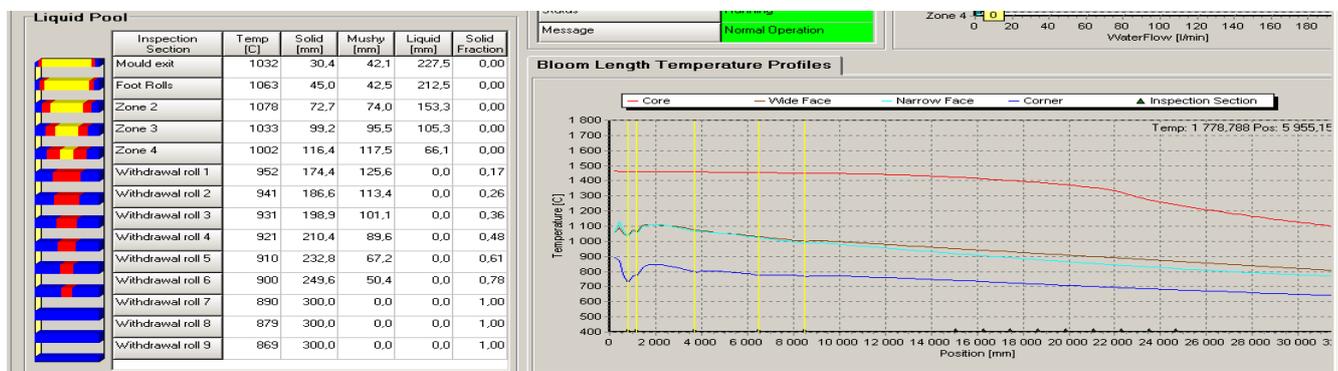


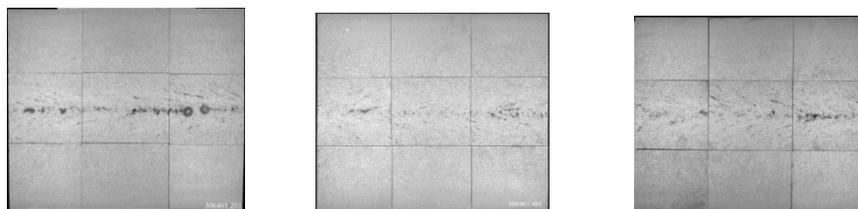
Рисунок 3. Фактические данные расчета жидкой лунки при разливке рельсовой марки стали

Таблица 3. Фактические значения усилий при работе с системой «мягкого» обжатия слитка

Э76Ф, R350НТ	Усилия на ПТМ, т								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость разливки 0,6 м/мин	-	-	14	30	36	40	50	-	-

Результаты оценки макроструктуры плавок, произведенных с учетом разработанных мероприятий, представлены на рисунке 4.

Рисунок 4. Макроструктура продольного сечения плавок произведенных по разработанным мероприятиям



Макроструктура продольного сечения всех плавок, произведенных по разработанным технологическим параметрам удовлетворительная. Зоны кристаллизации металла на всех исследуемых плавках и ручьях – достаточно широкая корковая зона с выраженной направленностью ориентированных дендритов. В центре зона мелких глобулярных дендритов (эквиполярная зона) достаточно широкая. Развитие столбчатой структуры на всех поперечных и продольных темплатах составляет менее 55 мм, имеет тонкое строение. Осевая пористость в продольном сечении представляет собой группы раковин размером до 10 мм в виде цепочек, ширина вытянутых раковин не превышает 3 мм.

Выводы: Проведение комплекса мероприятий, включающих в себя разработку оптимальной скорости вытягивания, вторичного охлаждения непрерывнолитого слитка, условий «мягкого» обжатия, позволили повысить качество макроструктуры непрерывнолитой заготовки сечением разливки 300×400 мм и снизить уровень внутренних дефектов типа «центральная пористость», «осевая ликвация». Проведенные мероприятия позволили вдвое сократить протяженность зоны столбчатых дендритов и существенно сократить зону осевой ликвации.

Библиографический список

1. С.А. Ботников. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла. Волгоград, 2011.- 97 с.
2. Огурцов А.П., Гресс А.В. Непрерывное литье стали. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 675 с.
3. Шаповалов А.Н. Расчет параметров непрерывной разливки стали: Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Разливка стали и специальная металлургия» для студентов направления 150400 «Металлургия». – Новотроицк, НФ НИТУ «МИСиС», 2013. – 56с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАФИНИРОВАНИЯ СТАЛИ ОТ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Погодин А.М., Комолова О.А., Григорович К.В.

Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, г. Москва

Аннотация. Одной из главных качественных характеристик стали является количество содержащихся в ней неметаллических включений (НВ). Многочисленные исследования влияния включений на механические и эксплуатационные свойства стали показывают, что НВ приводят к нарушению целостности металла и образованию в нем микротрещин из-за концентрации напряжений вокруг включений. Целью исследования является разработка математического описания и на его основе программного