

НОВЫЙ ПОДХОД К УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ

Л.Б. Медовар¹, А.П. Стовпченко³, П.Н. Кайда¹,
А.А. Полишко¹, В.В. Мощный², С.Ю. Гладилин²

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского».

51925, г. Днепропетровск, ул. Кирова, 18-Б. E-mail: dmkd@dmkd.dp.ua

³Инжиниринговая компания «ЭЛМЕТ-РОЛ».

А.я. 259, 03150, г. Киев. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Проанализированы причины появления повреждений рельсов в ходе их эксплуатации на современных высокоскоростных и тяжело нагруженных железных дорогах. Показано, что основной причиной выхода рельсов из строя являются повреждения усталостного происхождения, степень развития которых определяются составом и структурой рельсовой стали. Традиционные же способы повышения уровня ее свойств на сегодня практически исчерпаны. В этой связи, представляет интерес применение электрошлаковых технологий, способных повысить чистоту и металлургическое качество слитка. Опробовано применение шлака ЭШП в качестве смеси при непрерывной разливке заготовки, что позволяет обеспечить электрошлаковый обогрев мениска и снизить скорость разливки для улучшения внутреннего качества заготовки. Наряду с этим, экспериментально показана возможность увеличения более чем в два раза скорости вытяжки слитка при электрошлаковом переплаве электрода из рельсовой стали без ухудшения структуры слитка (усадочных и ликвационных дефектов не обнаружено). Эксперименты открывают перспективу создания гибридного процесса ЭШП + МНЛЗ для производства литой заготовки высокого качества. Библиогр. 21, табл. 2, ил. 6.

Ключевые слова: рельсы высокопрочные; непрерывная разливка; электрошлаковый процесс; слитки ЭШП; структура; сегрегация; качество поверхности

Введение. Высокие эксплуатационные свойства рельсов являются одним из главных условий обеспечения как эффективности, так и безопасности современных железных дорог. Развитие железнодорожного транспорта идет по пути интенсификации эксплуатации рельсового хозяйства за счет увеличения скорости движения пассажирских поездов и нагрузки на ось при перевозках. При качении и скольжении нагруженного быстро движущегося металлического колеса рельс испытывает фрикционные (в том числе абразивные), термические и деформационные воздействия вплоть до пластического течения металла рабочих поверхностей колеса и рельса. Установлено, что основной причиной выхода рельсов из строя являются повреждения усталостного происхождения, возникающие от трения и ударных нагрузок от колес подвижного состава.

Для уменьшения повреждений металл рельсов должен иметь высокую твердость и обеспечивать высокую контактно-усталостную прочность и устойчивость к износу металла головки, и, одновременно, пластичность и вязкость металла его шейки и подошвы.

Поэтому перед учеными-материаловедами и металлургическими заводами, производящими рельсовую сталь, стоит непростая задача обеспечить ее высокую прочность, пластичность, изно-

стойкость и устойчивость к знакопеременным нагрузкам. Сложность решения проблемы усугубляется тем, что известные экономически оправданные способы (легирование, модифицирование и термическая обработка) повышения уровня свойств рельсовой стали на сегодня практически исчерпаны.

Необходимо искать новые перспективные решения, среди которых, по нашему мнению, применение электрошлаковых технологий для повышения качества рельсовой стали.

Современные стали для рельсов и причины их повреждения. Повышение качества рельсов пусть и традиционная, но до настоящего времени так и не решенная задача. Один из крупнейших современных английских металлургов проф. Г. Бхадешиа недавно возведен в рыцарское достоинство за научное сопровождение производства высоконадежных рельсов для туннеля под Ла-Маншем.

Попытаемся проанализировать современные тенденции в металлургии рельсовой стали и наметить направления поисков, которые могут дать положительный результат.

Первые рельсы изготавливали из чугуна и поначалу железную дорогу называли «чугункой». Благодаря высокому содержанию углерода чугун обладает высокой твердостью и износостойко-

стью, однако ввиду низкой пластичности и сложности отливки длинных плетей уступил место стали. Кроме того, сложности сварки чугуна не давали возможности создания бесстыкового пути. Рельсовые стали сохранили в своем составе довольно высокое содержание углерода, который является самым эффективным и экономичным упрочнителем сплавов на основе железа. Однако при содержании углерода ~ 0,82 %, характерном для эвтектоидного превращения аустенита, возрастает вероятность появления цементитной сетки, пограничное расположение которой может быть причиной хрупкого разрушения. Поэтому наиболее распространенным типом рельсовой стали в настоящее время является металл с полностью перлитной микроструктурой. В последние десятилетия для рельсов, работающих с высокой боковой нагрузкой, начали применять высокоизносостойкие заэвтектоидные стали, а для всего пути — рельсы с бейнитной структурой [1–4].

Сегодня самые стойкие (1000...1200 млн брутто-тонн) прямые и длинные (до 150 м) рельсы производят в Японии. Японские рельсы имеют высокую износостойкость и сопротивление повреждению поверхности, что обеспечивает длительный срок службы и уменьшает затраты на шлифование, что в свою очередь повышает привлекательность их применения. Высокие результаты достигнуты благодаря тому, что производители обеспечивают (по их собственному определению) «чистые рельсы однородного качества». Сталь изготавливают из первородного сырья (железной руды) стандартизированным процессом (выплавка стали в кислородных конвертерах), в результате чего и получают высокопрочные рельсы стабильного качества. По сравнению с плавкой в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), передел первородного сырья обеспечивает более высокую чистоту металла и, в результате — высококачественные рельсы. Применение железа прямого восстановления для производства рельсов японскими специалистами на данном этапе не обсуждалось [5].

Существенное влияние на срок службы рельсов оказывает термообработка. Исследованиями ВНИИЖТ показано, что применение отдельного нагрева под закалку за счет получения мелкого зерна при его перекристаллизации в процессе повторного нагрева приводит к росту ударной вязкости в 1,4...2,0, копровой прочности — в 2,0, трещиностойкости в 1,5...1,8, критического размера усталостных трещин — в 2,3...2,5 раза [6].

Компания НКК (Япония) разработала высокоустойчивые термоупрочненные перлитные рельсы серии ТНН370 (класс прочности на разрыв 1300 МПа) для работы на тяжело нагруженных железных дорогах. В структуре этой рельсовой стали

межпластинчатое расстояние в перлите (МРП) менее 0,2 мкм обеспечивается т.н. «он-лайн» термообработкой. Улучшение характеристик перлитных стальных рельсов достигнуто преимущественно за счет уменьшения расстояния между перлитными lamелями [7]. Поскольку достигнутое уменьшение МРП в ТНН370 приближается к теоретическому пределу (0,1 мкм), то близок и предел возможностей перлитных стальных рельсов.

Общепризнанными факторами, оказывающими отрицательное влияние на контактную усталость качения и износ, является наличие неметаллических включений и большое МРП. Принято считать, что износостойкость рельсовой стали напрямую зависит от твердости и МРП. В то же время, в работе, выполненной под руководством известного американского металловеда проф. А. Ди Ардо [8], установлено, что присутствие доэвтектоидного цементита и размер зерна аустенита также играют важную роль в появлении контактной усталости качения и износе.

Положительное влияние измельчения структурных составляющих и развитой ячеистой дислокационной структуры на увеличение прочности и пластичности показали полигонные испытания железнодорожных рельсов Р65 из стали бейнитного класса марки Э30ХГ2САФМ. Интенсивность бокового и вертикального износа рельсов из стали этой марки на 10 и 23 % соответственно меньше по сравнению с интенсивностью износа объемно-закаленных рельсов из стали марки Э76Ф. Отметим, что полученный эффект достигнут при изменении химического состава стали и не может быть отнесен только к рафинированию структуры, поскольку сталь дополнительно легирована хромом, азотом, ванадием и молибденом. Введение 0,07...0,08 % ванадия и 0,012...0,017 % азота повысило пластические свойства и ударную вязкость стали с высоким содержанием углерода, а также обеспечило повышение сопротивления рельсов хрупкому разрушению [9].

Микроструктуры и поведение при износе в условиях контактной усталости качения/скольжения пяти бейнитных сталей с низким содержанием углерода и легированием молибденом и бором изучены авторами [10]. Износостойкость увеличивалась при наличии в структуре стали безкарбидного бейнита. Количество этой формы бейнита в микроструктуре росло при более высоком содержании углерода и скорости охлаждения. Сталь с 0,18 % С и 1,13 % Si в закаленном состоянии имела такие же характеристики при износе, как и перлитные рельсы с закаленной головкой с 0,8 % С [10].

Пригодность перлитных и бейнитных рельсовых сталей для использования на железных дорогах, где есть проблемы контактно-усталост-

ного разрушения при качении колеса, исследовали специалисты компании «Системтехник» [11]. Показано, что при правильном легировании и контроле формы сульфидов, естественно твердая сталь без термообработки может быть альтернативой рельсам с закаленной головкой. Бейнитные рельсовые стали могут обеспечить баланс между процессами износа и контактной усталости на невысоком уровне. Тем не менее, с учетом изменившихся представлений о механизмах изнашивания перлитной стали должна обеспечиваться их минимальная прочность. Результаты работы [11] показывают, что высокохромистая сталь со средним содержанием углерода и, следовательно, значительно большей прочностью, обеспечивает лучшую износостойкость, чем высокомарганцовистая сталь с низким содержанием углерода.

Сравнительная оценка эффективности железнодорожных рельсов известных производителей была сделана методом т.н. «премиум-теста» в Transportation Technology Center, США [12]. Испытывали десять различных видов рельсов семи производителей. Анализ металла головки рельса показал, что все стали можно считать очень чистыми. Количество оксидов и пор в головке относительно невелико (менее 5 % по объему) во всех тестируемых рельсах. Однако в некоторых рельсах премиум класса было обнаружено превышение максимального содержания сульфидов (до 45 %). Оценка микроструктуры головки показала, что все рельсы имеют полностью перлитную структуру, что отвечает рекомендациям Американской ассоциации Железнодорожной техники и обслуживания путей (The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association — AREMA) для рельсов премиум класса и рельсов средней твердости. Однако при анализе с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в некоторых рельсах премиум класса обнаружены выделения доэвтектоидного цементита (Fe_3C) по границам зерен. Наличие Fe_3C может способствовать появлению контактной усталости качения (RCF). На практике при эксплуатации железных дорог установлено, что причиной образования Fe_3C на границах зерен являются неблагоприятные состав металла и термомеханическая обработка. Наличие доэвтектоидного цементита в сочетании с повышенным количеством неметаллических включений ведет к появлению контактно-усталостного разрушения при качении. Усталостные трещины, инициируемые в межкристаллитном цементите, могут перерасти во вторичные трещины на неметаллических включениях (НВ), что ускоряет усталость металла головки рельса.

Авторы работы [13] указывают на то, что большое влияние на качество стали для рельсов высо-

коскоростных железных дорог (более 350 км/ч) оказывают неметаллические включения. Благодаря оптимизации технологии контроля НВ была улучшена чистота рельсовой стали. При этом изменились состав, распределение и форма НВ. Общее среднее содержание кислорода снизилось до $10,17 \cdot 10^{-6}$ и процент назначения рельсов для высокоскоростных железных дорог по результатам комплексной приемки по НВ увеличился с 48,21 до 98,1 %.

Специалисты по контактной сварке установили, что скопления включений алюмосиликатов, так называемых матовых пятен, и оксидные пленки более сложного состава формируются в сварном соединении на базе исходных неоднородно распределенных НВ в металле рельса [14].

В работе [15] на основе анализа образцов рельсовой стали опытных партий, прошедших эксплуатационные испытания на опытном кольце ВНИИЖТ и литературных данных сделан вывод о том, что наибольшее влияние на эксплуатационные свойства рельсов оказывает высокое содержание крупных недеформируемых высокоглиноземистых оксидных НВ с содержанием оксида алюминия более 50 %.

Собственный опыт оптимизации внепечной обработки (вакуумирования и финишного раскисления алюминием и кальцием) колесной стали показал целесообразность снижения содержания кислорода в металле за счет его самораскисления углеродом и сокращения применения раскислителей, что способствует уменьшению содержания в стали водорода и НВ [16].

В одной из последних публикаций ВНИИЖТ [17] установлено, что основным видом повреждения рельсов, обуславливающим их замену в объеме свыше 50 % общего количества изымаемых рельсов, являются дефекты контактно-усталостного характера. В настоящее время исследованы причины зарождения и развития дефектов контактной усталости рельсов, из которых основной является уже не низкая чистота стали по НВ и наличие строчек хрупко разрушенных НВ в виде алюмосиликатов и других сложных окислов, а деструкция поверхностного слоя металла головки рельса под воздействием циклической пластической деформации. На примере рельсов категории Т1 установлено, что на этапах деструкции металла головки рельса происходит образование наклепанного слоя с микроструктурой волокнисто-деформированного перлита; образование трещин при деформации уже наклепанного упрочненного слоя с волокнисто-деформированной микроструктурой и пониженными на четверть временным сопротивлением и в 4 раза относительным удлинением; развитие трещин и образование небольших выкрашиваний (питтингов) с их последующим развитием до

образования выкрашиваний металла глубиной до 4,0 мм, а также образование продольных трещин глубиной до 6...10 мм с последующим поворотом и развитием поперечных усталостных трещин.

Тем не менее, степень деструкции поверхностного слоя, свойства и характер разрушения деформированной структуры перлита зависят от исходной прочности и пластичности металла, которые, в свою очередь, определяются его составом, структурой и наличием концентраторов напряжения и хрупких составляющих.

Из выполненного анализа литературных данных следует, что срок службы современных рельсов премиум-класса уменьшается при наличии в структуре цементита на границах аустенитных зерен и НВ (особенно большого размера и строчек), а также при большом межпластинчатом расстоянии перлита. Сегодня основными параметрами, совершенствование которых может повысить комплекс пластических свойств рельсов без изменения химического состава, являются совершенство тонкой структуры и чистота стали. Последняя определяется содержанием примесных элементов (в т.ч. цветных металлов), газов (кислород, азот, водород) и неметаллических включений (оксиды, сульфиды, окисульфиды, силикаты и нитриды) в стали.

Поскольку специалисты в области железнодорожного транспорта и металлургии считают, что предел улучшения чистоты и свойств сталей для рельсов в традиционном металлургическом цикле практически исчерпан, авторы данной работы выполнили анализ известных результатов применения электрошлаковых технологий (ЭШТ), а также возможностей, которые они дают для повышения качества рельсов.

Опыт применения ЭШП для изготовления рельсов. Процессы электрошлакового переплава (ЭШП) широко используют для производства высококачественных слитков из специальных сталей и сплавов. С помощью этого метода переплавляемый металл глубоко обрабатывают расплавленным шлаком, что помогает очистить металл от примесей и НВ. Рафинированный металл кристаллизуется в водоохлаждаемом кристаллизаторе при постоянной подпитке горячим расплавом в условиях высокого градиента температур, что создает благоприятные условия для роста столбчатых дендритов, формирующих бездефектную плотную структуру слитка ЭШП.

Возможности ЭШП для получения рельсов высокого металлургического качества с увеличенным сроком службы опробованы еще в 60-е годы прошлого столетия, а затем подтверждены в начале 1990-х годов. Технологическая схема производства рельсов способом ЭШП включала

следующие основные операции: выплавка рельсовой стали М76 в мартеновской печи; разливка в слитки массой 9,96 т для получения расходуемых электродов; электрошлаковый переплав в слитки массой 8,5 т [18].

Слитки после ЭШП прокатывали и термообработывали по традиционной технологии.

Исследования [18] опытной партии нетермообработанных рельсов, изготовленных из мартеновского металла, который подвергся ЭШП, показали, что в полученных рельсах, достигнута очень высокая степень чистоты стали по сравнению с изготовленными традиционным способом (максимальная загрязненность оксидами по ГОСТ 1778–62 составила 2 балла, суммарная плотность строчечных включений — 0,6 мм/см², общее содержание устойчивых оксидных включений — 0,0038 %, а для стали обычных рельсов аналогичные показатели составили соответственно 3...4 балла, 4,5 мм/см² и 0,0103 %). Таким образом, использование технологии ЭШП позволило снизить содержание устойчивых НВ в 2...2,5 раза, а плотность строчечных оксидных включений почти в 8 раз.

Сравнивая качество рельсов из металла, полученного ЭШП и другими методами (обработкой синтетическими шлаками, раскислением силико-кальцием и феррованадием), при которых достигалось некоторое повышение прочности стали, установили, что прочностные свойства рельсов ЭШП практически не отличаются от показателей традиционного производства. Рост эксплуатационной стойкости рельсов ЭШП достигается, по мнению авторов [17], благодаря значительному повышению чистоты рельсовой стали. Полномасштабные полевые испытания экспериментальной партии рельсов из стали ЭШП провели на кольце радиусом 400 м с укладкой их на деревянные шпалы. Каких-либо дефектов на контактной поверхности не появилось вплоть до завершения испытаний (477 млн брутто тонн).

На контактной поверхности сравнительных рельсов М76 дефекты появились уже после прохода 100...140 млн брутто тонн. Таким образом, испытания показали, что долговечность рельсов из металла ЭШП в 3,4...4,7 раза выше, чем из металла обычной выплавки [17]. Однако стоимость рельсов ЭШП составила в то время 185...188 долл./т по сравнению со стоимостью традиционных рельсов 89 долл./т (сравнительная оценка цен 1990 г. в советских рублях, по курсу 1,8 рубля за доллар США).

Двукратное увеличение стоимости при применении ЭШП стало в то время основным препятствием для его использования в производстве рельсов. Тем не менее, положительный опыт

применения ЭШП для повышения качества рельсов явился отправной точкой для формирования современного понимания необходимого уровня чистоты рельсовой стали. На его основании в последнее время проведены новые исследования возможностей ЭШП в производстве рельсов наивысшего качества.

Постановка задачи и эксперименты по применению ЭШП для производства рельсов премиум качества. Новый этап исследований возможностей применения ЭШП в производстве рельсов наивысшего качества опирался на следующие предположения:

применение стандартного ЭШП расходуемого электрода в открытой атмосфере нецелесообразно, т.к. не позволяет обеспечить низкий уровень содержания газов, например, кислорода менее 10 мас. %;

ЭШП расходуемого металла в контролируемой атмосфере может быть применен для изготовления небольших партий рельсов качества для особо нагруженных участков пути, например, в гористой местности;

ЭШП с прямым использованием жидкого металла (ЭШП ЖМ) может дать положительные результаты для повышения качества в производстве большего количества рельсов;

исследования целесообразно сосредоточить на создании комбинированного процесса, объединяющего преимущества непрерывной разливки и ЭШП.

Известно, что современные рельсы изготавливают прокаткой из непрерывнолитых заготовок (реже из слитков) с последующей термической обработкой. Структура и сплошность литой заготовки существенным образом влияет на качество конечной продукции, поскольку дефекты сталеплавильного передела зачастую невозможно устранить последующими операциями.

Скорость разливки на МНЛЗ составляет от полуметра до нескольких метров в минуту, в зависимости от сечения непрерывнолитой заготовки (НЛЗ). Такая высокая скорость разливки НЛЗ приводит к образованию очень глубокой жидкой лунки (например, для заготовки квадрат 200 мм длина жидкой лунки составляет 4...7 м при различной скорости вытягивания). Естественно, что при таких условиях разливки подпитка усадки НЛЗ ограничена. В результате в осевой части появляются дефекты ликвационного происхождения и пористость. Однако значительно уменьшить глубину жидкой лунки невозможно, поскольку существует определенный предел ниже которого снижение скорости разливки на МНЛЗ невозможно. Ниже этой критической скорости разливки поверхность

мениска остывает, образуются завороты корочки и качество поверхности заготовки ухудшается.

При ЭШП получают очень плотную бездефектную структуру металла за счет постоянной подпитки усадки затвердевающего слитка. Чтобы обеспечить высокое качество металла, производительность процесса ЭШП устанавливается исходя из условий затвердевания качественного плотного слитка и, поэтому, она значительно меньше, чем на машине непрерывной разливки.

Идея объединения преимуществ обоих процессов не нова. Она описана еще в книге Б.И. Медовара и его учеников «Электрошлаковый переплав», изданной более полувека назад. Еще тогда были показаны перспективы этой комбинации для разливки высоколегированной стали, для которой формирование хорошей поверхности является главной проблемой. Было предложено организовать обогрев мениска в кристаллизаторе МНЛЗ путем нагрева слоя жидкого шлака, который формируют на поверхности зеркала металла за счет подачи электрического тока через нерасходуемые электроды. Такая своеобразная тепловая защита мениска должна предотвратить образование поверхностных дефектов заготовки [19]. Те годы были временем становления ЭШП и непрерывной разливки в промышленности и эта идея была лишь описана, но не опробована.

Изобретение в ИЭС им. Е.О. Патона токоподводящего кристаллизатора открыло возможность организации нагрева шлака с помощью токоведущей секции, что позволяет изменять в широких пределах скорость плавления (поступления в кристаллизатор) металла и формирования слитка в процессе ЭШП и стало основой для различных технологий ЭШП с прямой переработкой жидкого металла.

Нагрев в токоведущем кристаллизаторе (в отличие от традиционного ЭШП) может быть организован и без расходуемого электрода с подачей жидкого металла, как при непрерывной разливке. Напомним, что ЭШП ЖМ [20] реализован в промышленном производстве для наплавки композитных валков с рабочим слоем из тепло- и износостойких марок стали. Толщина наплавляемого слоя составляет 100...200 мм. Плотная дендритная структура наплавленного слоя обеспечивает высокие показатели прочности и износостойкости поверхности (в литом термообработанном состоянии) валка, эксплуатируемого в условиях контактного износа и высоких температур (при прокатке на стане). На той же установке специалистами НКМЗ произведены и полые слитки из теплостойких сталей, в макроструктуре металла которых отсутствуют поры и дефекты ликвационной природы [21]. Опыт эксплуатации установки ЭШП ЖМ показал также, что производительность процесса с жидким

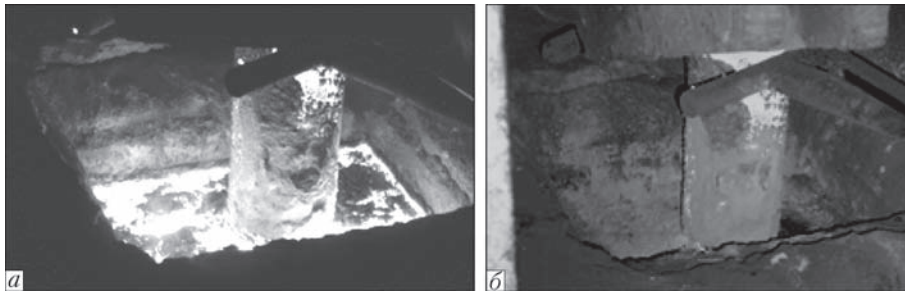


Рис. 1. Вид мениска металла в кристаллизаторе сечением 335×400 мм МНЛЗ до (а) и после (б) добавления шлака ЭШП

металлом может быть существенно выше, чем традиционного ЭШП с расходуемым электродом.

Процесс ЭШП с вытяжкой слитка и, особенно ЭШП ЖМ, довольно близки по своей сути к непрерывной разливке. Однако, для объединения преимуществ этих процессов необходимо решить целый ряд задач как конструктивного, так и технологического плана.

Первая попытка вести электрошлаковый нагрев с применением стандартной разливочной смеси для непрерывной разливки оказалась неудачной. Традиционная смесь для МНЛЗ содержит в своем составе много свободного углерода и, естественно, при ее высокотемпературном сплавлении образуется шлак с высоким содержанием карбидов, который имеет очень высокую температуру плавления и вязкость. Кроме того, электропроводность образующегося шлака не соответствует условиям эффективного ведения процесса. Поэтому, выполнили опробование возможности использования шлака ЭШП (АНФ-28М) в кристаллизаторе МНЛЗ при существующих скоростях разливки. Содержание компонентов составляло, %: 47 CaF₂; 3 Al₂O₃; 21 CaO; 11 MgO; 18 SiO₂.

Эксперимент проводили на МНЛЗ № 2 Днепропетровского металлургического комбината им. Ф.Э. Дзержинского в кристаллизаторе с попе-

речным сечением 335×400. Температура стали в промежуточном ковше до начала эксперимента составляла 1554 °С, скорость разливки — 0,5 м/мин и ее не изменяли при переходе на новый шлакообразующий состав. После открытия мениска подачу жидкого металла (рис. 1, а) временно прекратили и засыпали экспериментальный шлак слоем 10...15 мм (рис. 1, б), после чего стопор был полностью открыт и кристаллизатор наполнен до заданного уровня.

Каких-либо существенных различий вида поверхности в сравнении со стандартной заготовкой, при визуальном осмотре и небольшом увеличении, а также поверхностных дефектов (трещин, плен, надрывов, пузырей, пятен и т.д.), выявлено не было (рис. 2).

Удовлетворительное качество поверхности показывает пригодность опробованного шлака ЭШП для использования на зеркале металла в кристаллизаторе МНЛЗ.

Выполнили также эксперименты по повышению производительности традиционного ЭШП расходуемого электрода с целью экономичности производства рельсовой стали.

В качестве расходуемого электрода взяли рельс К76 (0,8 % С) промышленной выплавки (рис. 3). Использовали шлак АНФ-29, близкий по составу и свойствам к шлаку при испытаниях на МНЛЗ. Выплавляли два слитка диаметром 180 мм со скоростями вытяжки 20 и 40 мм/мин. Из обоих слитков вырезали образцы для исследований макро- и микроструктуры металла.

Отпечатки по Бауману оказались практически чистыми ввиду низкого общего содержания серы



Рис. 2. Внешний вид поверхности заготовок МНЛЗ, полученных с использованием стандартной разливочной смеси (а) и шлака ЭШП (б), ×50

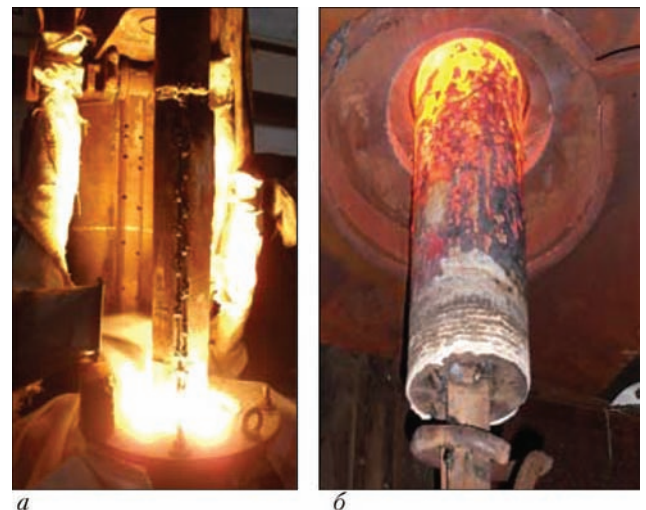


Рис. 3. Плавление электрода (а) и вытяжка слитка диаметром 180 мм (б)

в металле после ЭШП, и отсутствия в слитках каких-либо сегрегаций и скоплений серосодержащих включений.

Макроструктура продольных темплетов слитков ЭШП диаметром 180 мм, полученных при обеих скоростях вытяжки, однородная и плотная, без пор, шлаковых включений, расслоений, трещин и несплошностей (рис. 5).

Дендритная структура на макротемплетах слабо выражена, что, по-видимому, обусловлено особенностями травления рельсовой стали, однако свидетельствует об отсутствии значительной дендритной ликвации.

Микроструктура всех образцов дендритная, регулярная.

Для характеристики дендритной структуры полученных слитков измерили расстояние между осями первичных и вторичных столбчатых дендритов в структуре металла ЭШП в литом состоянии (без термической обработки). Микрофотографии характерных полей приведены на рис. 5.

Дендритной сегрегации и выделений избыточных фаз по границам зерен не обнаружено. Расстояния между первичными и вторичными осями дендритов в первом слитке, сформированном при меньшей скорости подачи металла, несколько больше, хотя визуально структуры отличаются не существенно (табл. 1).

Металл слитков ЭШП имеет типичную перлитную равномерную микроструктуру с тонкими ламелями цементита. Измерения межпластинчатого расстояния в перлите показали близкие результаты для металла обоих слитков.

Дисперсность перлита в металле слитков после ЭШП меньше, чем обычно наблюдаемая в образцах рельсовой стали после деформации и термической обработки (~0,2 мкм), однако следует учитывать, что это литой металл без деформации и термической обработки.

Расстояния между первичными и между вторичными осями ветвей являются прямыми показателями тонины дендритной структуры.

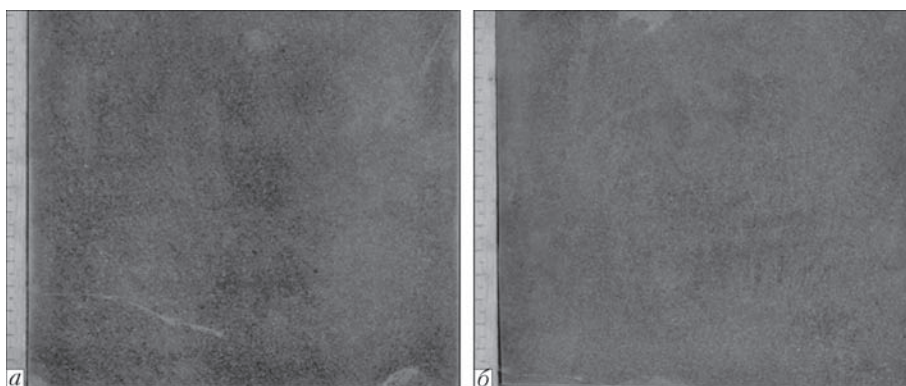


Рис. 4. Макроструктура металла слитков ЭШП из рельсовой стали, выплавленных со скоростью вытяжки 20 (а) и 40 (б) мм/мин

Достигнутое измельчение ее при увеличении производительности традиционного ЭШП свидетельствует о повышении скорости охлаждения, которая обеспечивается удалением фронта кристаллизации от места поступления металла с температурой выше ликвидуса при увеличении скорости вытяжки слитка. При этом лунка становится глубже, однако не настолько, чтобы нарушить подпитку затвердевающего фронта и вызвать образование ликвационных и усадочных дефектов.

В то же время, увеличение производительности традиционного ЭШП в два раза позволит значительно снизить удельный расход электроэнергии на передел. Основываясь на мировом опыте применения скоростных процессов ЭШП можно ожидать, что увеличение стоимости рельсов при их изготовлении традиционным способом ЭШП с расходуемыми электродами не будет превышать 100...300 дол. США за тонну. Однако производительность его может оказаться недостаточной для выпуска конкурентоспособной продукции.

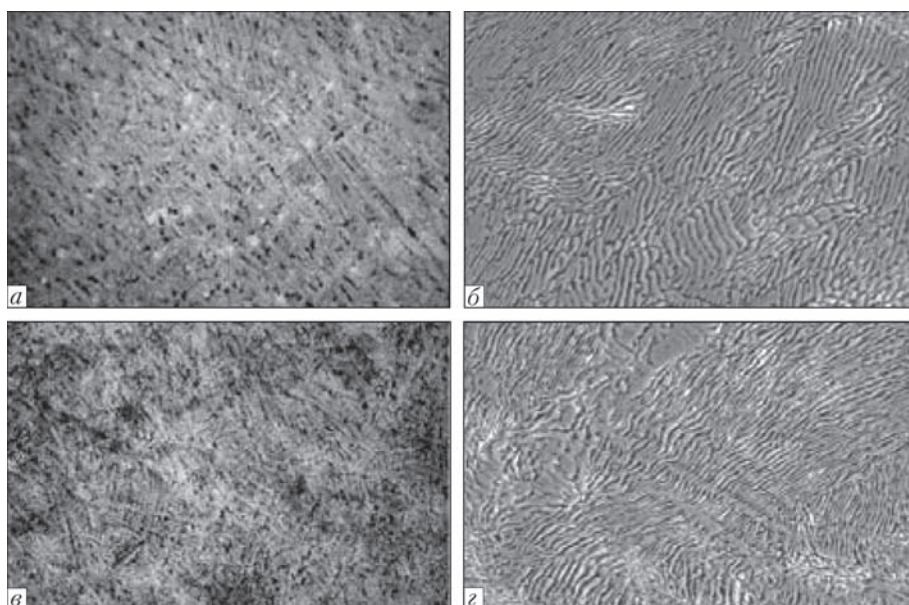


Рис. 5. Микроструктура литого металла слитков ЭШП рельсовой стали, полученных при различных скоростях вытяжки, мм/мин: а, б — 20; в, г — 40; а, в — $\times 400$; б, г — $\times 2000$

Т а б л и ц а 1. Размер структурных составляющих в слитках ЭШП рельсовой стали диаметром 180 мм

Скорость вытяжки слитка, мм/мин	Расстояние между осями, мкм		Межпластинчатое расстояние в перлите, мкм
	первичными	вторичными	
20	248	82	0,74
40	162	43	0,56

Т а б л и ц а 2. Расчетные показатели производительности МНЛЗ при применении электрошлакового обогрева мениска кристаллизатора сечением 335×400 мм

Показатель	Обычный ручей	ЭШ + НР	МНЛЗ с пятью обычными ручьями и одним ЭШ + НР	МНЛЗ с тремя обычными ручьями и тремя ЭШ + НР
Средняя скорость разливки, м/мин	0,6	0,28	5,78	4,14
Производительность, т/год	333920	85000	1750000	1260000

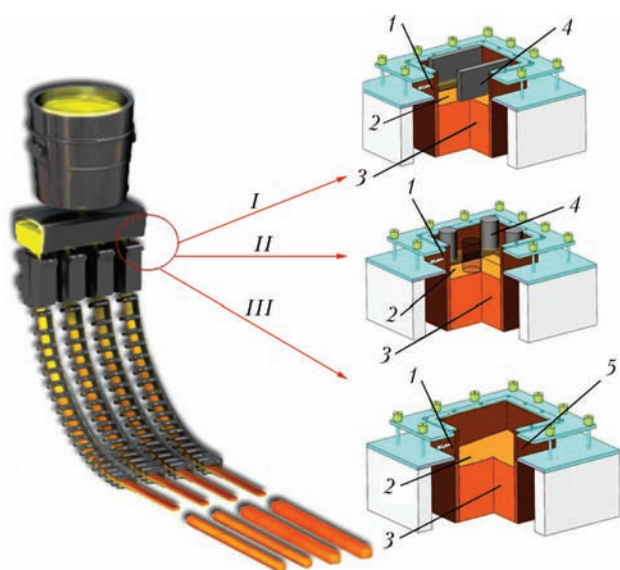


Рис. 6. Схемы вариантов электрошлакового нагрева мениска на МНЛЗ: 1 — кристаллизатор МНЛЗ; 2 — шлак; 3 — заготовка МНЛЗ; 4 — электрод; 5 — токоведущая секция

Более перспективным представляется создание гибридного процесса ЭШП + МНЛЗ. Предварительные расчеты показывают, что скорость разливки для обеспечения высокого качества заготовки может составить 0,2...0,5 минимальной скорости разливки непрерывно литых заготовок (НЛЗ) данного сечения. При этом для обеспечения качества поверхности заготовки необходимо поддерживать температуру мениска нагревом покровного шлака.

Проработки способов создания нового процесса показывают, что он может быть реализован путем реконструкции МНЛЗ. Однако необходим ряд конструктивных и технологических изменений, связанных с увеличением времени пребывания жидкого металла в ковше, снижением температуры стали в промковше, а также организацией заливки жидкого шлака в кристаллизатор и поддержания его уровня. В пилотном варианте возможна установка электро-

шлакового подогрева на кристаллизатор на одном ручье (назовем его ЭШ+НР), что даст возможность провести объективное сравнение эффективности предложенного технического решения, а в перспективе позволит производить заготовки обычного и премиум качества на одной машине, регулируя ее производительность (табл. 2) в зависимости от портфеля заказов.

Известны и могут быть реализованы различные варианты электрошлакового подогрева шлакового слоя на поверхности мениска кристаллизатора нерасходуемыми электродами (рис. 6) плоскими (I) или цилиндрическими (II) с их симметричным расположением в сечении кристаллизатора, а также с использованием токоподводящей надставки на кристаллизатор (III).

Нагрев мениска позволит уменьшить скорость разливки и улучшить внутреннее качество заготовки без ухудшения качества ее поверхности.

В настоящее время ведутся численные эксперименты на математической модели кристаллизатора со шлаковым нагревом мениска для определения рациональных параметров процесса формирования НЛЗ, а также работы по конструированию соответствующего устройства для опробования предложенного гибридного процесса в промышленности. Полученные результаты будут опубликованы в следующих статьях.

Выводы

Возможности традиционной металлургии в улучшении чистоты и свойств стали для рельсов сегодня практически исчерпаны и, поэтому, представляет интерес применение для этой цели электрошлаковых технологий, обеспечивающих высокое качество получаемых слитков за счет медленного последовательного его формирования.

Результаты первых экспериментов по применению шлака для электрошлакового процесса в качестве смеси покрывающей зеркало металла на действующей машине непрерывного литья заготовки показали принципиальную возможность электрошлакового обогрева мениска, что позволит снизить скорость разливки и улучшить внутреннее качество заготовки.

Показано, что на традиционной печи ЭШП с расходуемыми электродами возможно увеличение скорости вытяжки слитка более чем в два раза (по сравнению с типичной для ЭШП) без изменений в структуре стали. Полученные слитки имеют однородное плотное строение без каких-либо усадочных и ликвационных дефектов, что является предпосылкой для производства из них рельсов премиум качества.

Экспериментальная проверка и предварительная проработка показали перспективность создания гибридного процесса ЭШП + МНЛЗ, способного выпускать заготовку высокого качества с удовлетворительной производительностью.

1. *Bhadeshia H.K.D.H.* High performance bainitic steels // Materials Science Forum. — 2005. — **500–501**. — P. 63–74.
2. *Рельсовая сталь для высокоскоростных линий // Железные дороги мира.* — 2006. — № 11. — С. 71–77.
3. *Рельсовая сталь — эволюция и перспективы // Там же.* — 2008. — № 5. — С. 59–64.
4. *Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Харрис, С. Захаров, Д. Ландгрэн и др.* — М.: Интекст, 2002. — 416 с.
5. <http://www.nssmc.com/en/product/use/railway/features.html>.
6. *Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения / А.И. Борц, Е.А. Шур и др. // Вестн. ВНИИЖТ.* — 2013. — № 6. — С. 14–19.
7. *Saeki K., Iwano K.* Progress and prospects of rail for railroads nippon steel & sumitomo metal technical report. — № 105. — 2013. — P. 21–25.
8. *Development of high performance steels for rail / R. Orgonez, Cl. Garcia, S. Kalay, A.J. Deardo // Proc. of Joint Rail Conference 2010 (Urbana, Illinois, USA, 27–29 April 2010).* — Illinois, 2010. — V. 1. — P. 129–133.
9. *Технология производства и эксплуатация опытных рельсов НКМК на Восточно-сибирской железной дороге /*

- В.П. Дементьев, Л.В. Корнева, А.И. Серпянов и др. // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации Российских железных дорог»: Иркутск, 10–11 окт. 2007 г. — Иркутск, 2007. — Т. 1. — С. 29–34.*
10. *Jin N., Clayton P.* Effect of microstructure on rolling/sliding wear of low carbon bainitic steels // Wear. — 1997. — **202**, № 2. — P. 202–207.
11. *Rail materials — Alternatives and limits / K. Mädler, A. Zoll, R. Heyder, M. Brehmer.* — <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/s.1.3.4.1.pdf>
12. *Szablewski D., Kalay S., Lopresti J.* Development and evaluation of high performance rail steels for heavy haul operations // Transportation Technology Center (TTCI) Pueblo, Colorado, USA. — http://www.railway-research.org/IMG/pdf/c1_lopresti_joseph.pdf
13. *Zhao Ke-wen, Zeng Jian-hua, Wang Xin-hua.* Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel // J. of Iron and Steel Research, International. — 2009. — **16**, № 3. — P. 20–26.
14. *Дефекты соединений высокопрочных рельсов выполненных контактно-стыковой сваркой оплавлением / С.И. Кучук-Яценко, С.И. Швец, В.И. Дидковский и др. // Автомат. сварка.* — 2013. — № 9. — С. 3–9.
15. *Optimization of the ladle treatment of the rail steel / S. Shibaev, A. Garber, A. Trushnikova, K. Grigorovich // Proc. of the 4th Intern. Congress on the Science and Technology of Steelmaking (ICS2008), Gifu, Japan, 6–8 Oct. 2008.* — Gifu, 2008. — P. 326–329.
16. *Повышение эффективности вакуумирования металла для железнодорожных колес / В.В. Тягний, А.П. Стовпченко, Ю.Н. Грищенко и др. // Сталь.* — 2007. — № 8. — С. 30–33.
17. *Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости / Е.А. Шур, А.И. Борц, А.В. Сухов и др. // Вест. ВНИИЖТ.* — 2015. — № 3. — С. 3–8.
18. *Беиенцев А.В., Галушка А.А., Шур Е.А.* О выборе технологической схемы производства рельсов ЭШП в условиях металлургического комбината «Азовсталь» // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1992. — № 2. — С. 22–28.
19. *Электрошлаковый переплав / Б.И. Медовар, Ю.В. Латаш, Б.И. Максимович, Л.М. Ступак.* — М.: Металлургиздат, 1963. — 170 с.
20. *New electroslog technologies / L. Medovar, A. Tsykulenko, V. Saenko et al. // Proc. of the Intern. Symposium on Electroslog Remelting Technologies and Equipment, 15–17 May 2001, Kyiv, Ukraine, P. 49–61.*
21. *Medovar L., Stovpchenko G.* ESR of the heavy hollow ingots // Proc. of 1st Intern. conf. on Casting, Rolling and forging, Aachen, Germany CD, 3–7 June 2012.

Causes of appearance of damages in rails during service are analyzed on the modern high-speed and heavy-loaded railroads. It is shown that the main cause of rails coming out of order are the damages of a fatigue origin, the degree of development of which is determined by the composition and structure of the rail steel. However, the traditional methods of improving the level of its properties at the present time are almost exhausted. In this connection, the application of electroslog technologies capable to increase the purity and metallurgical quality of the ingot represents an interest. The application of the ESR slag as a mixture in the continuous casting of billet was tested, that allows providing the electroslog heating of a meniscus and reducing the casting speed for the improvement of the billet inner quality. In addition, the possibility of increasing the speed of ingot withdrawal by more than two times in electroslog remelting of electrode of rail steel without deterioration of ingot structure was shown experimentally (shrinkage and liquation defects were not detected). The experiments open up the prospects for creation of the hybrid process of ESR + MCCB for the producing of the high-quality cast billet. 21 Ref., 2 Tables, 6 Figures.

Key words: high-strength rails; continuous casting; electroslog process, ESR ingots; structure; segregation; surface quality

Поступила 18.01.2016