

На правах рукописи



**Шевченко**  
**Евгений Александрович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ  
С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИСКАЖЕНИИ  
ПРОФИЛЯ СЛЯБОВ**

Специальность 05.16.02 –  
Металлургия черных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель      Столяров Александр Михайлович  
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Паршин Валерий Михайлович  
доктор технических наук, директор Центра по непрерывной разливке стали ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина».

Юречко Дмитрий Валентинович  
кандидат технических наук, ведущий специалист  
Дирекции ОАО «Магнитогорский  
металлургический комбинат».

Ведущая организация – ФГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск.

Защита состоится 23 июня 2015 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.111.01 при ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте [www.magtu.ru](http://www.magtu.ru).

Автореферат разослан «    »                      2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Селиванов  
Валентин Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Актуальной задачей разливки стали на МНЛЗ является получение непрерывнолитой заготовки высокого качества – с отсутствием или с минимальной степенью развития различных дефектов: внутренних, поверхностных, формы сечения. К дефектам формы сечения относятся разные виды дефектов искажения геометрической формы поперечного сечения – профиля заготовки. Непрерывнолитые слябы меньше подвержены образованию таких дефектов, однако имеются технологические и конструктивные предпосылки для их развития. При разливке стали в ОАО «Уральская Сталь» на одноручьевого МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком фирмы «SMS Demag», кристаллизатором длиной 900 мм и поддерживающей системой на его раме из одного ряда роликов, отливаемые слябы разного сечения имели неодинаковое качество. Большинство (до 95 % от общего количества) слябов сечением 270×1200 мм имели искажение профиля в виде выпуклости узких граней величиной до 15 мм. Подавляющая часть прорывов жидкого металла – в 80 % случаев, произошла при отливке слябов такого сечения. Доля отсортировки горячекатаного листа, полученного из слябов сечением 270×1200 мм, оказалась существенно выше, чем проката из слябов сечением 190×1200 мм, не имевших искажения профиля. Увеличение количества роликов, расположенных на раме кристаллизатора, с одного до четырех для поддержки каждой узкой грани сляба толщиной 270 мм позволило уменьшить величину выпуклости граней, но не устранило искажение профиля заготовки полностью. Поэтому актуальной задачей стало повышение качества непрерывнолитых слябов сечением 270×1200 мм.

**Целью диссертационной работы** является повышение качества непрерывнолитых слябов в результате разработки научно-обоснованных рекомендаций для предотвращения искажения профиля заготовки, отлитой на МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком в условиях недостаточной поддержки узких граней.

Для достижения этой цели в условиях ОАО «Уральская Сталь» потребовалось решить следующие задачи:

- изучить влияние искажения профиля слябовой заготовки сечением 270×1200 мм на качество литого металла и горячекатаного листа;
- исследовать структурные составляющие и механизм искажения профиля непрерывнолитого сляба;
- определить причины искажения профиля сляба сечением 270×1200 мм;
- разработать конструктивные и технологические рекомендации для предотвращения искажения профиля сляба сечением 270×1200 мм при разливке стали на МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком;

– оценить экономическую эффективность внедрения мероприятий для предотвращения искажения профиля слябовой заготовки.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

– структурными составляющими искажения профиля непрерывнолитого сляба, формирующегося в условиях недостаточной поддержки узких граней, являются выпуклость узких граней величиной 3–15 мм и вогнутость приребровой зоны широких граней шириной 50–143 мм и глубиной 0,5–4,0 мм, между величинами которых существует тесная взаимосвязь;

– предложен механизм формирования искажения профиля непрерывнолитого сляба, отлитого на МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком в условиях недостаточной поддержки узких граней, заключающийся в выпучивании середины узкой грани под распирающим давлением расплава с разворотом заоложенных углов и образованием прогиба прикомочной части широкой грани заготовки;

– разработана методика определения рациональной длины роликовой проводки, расположенной на раме кристаллизатора, для поддержки узких граней сляба с целью предотвращения их искажения, основанная на сопоставлении прочности затвердевшей корочки узкой грани сляба и расчетного значения распирающего давления жидкого металла;

– для температурного интервала 900–1400 °С экспериментально определены значения условного предела текучести литой стали марок 09Г2С, 15ХСНД и СтЗсп в диапазоне 5,04–0,73 МПа.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что для предотвращения искажения профиля слябовой заготовки сечением 270×1200 мм рекомендованы рациональные параметры температурно-скоростного режима разливки стали, предложена замена узких плит кристаллизатора плоской формы на трехплоскостные или с параболической формой поверхности, либо на плиты с угловыми выступами. Разработана универсальная методика определения рациональной протяженности роликовой проводки на раме кристаллизатора для поддержки узких граней сляба, основанная на сопоставлении прочности затвердевшей корочки узкой грани заготовки и распирающего давления жидкого металла. Методика может быть полезной при реконструкции существующих и проектировании новых МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком, имеющих поддерживающую систему на раме кристаллизатора. По разработанной методике для условий ОАО «Уральская Сталь» определена рациональная протяженность роликовой проводки на раме кристаллизатора для поддержки узких граней сляба сечением 270×1200 мм с целью предотвращения их искажения. Ожидаемый экономический эффект от внедрения удлиненной поддерживающей системы составит 5,73 млн. рублей в год. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений при изучении металлургических дисциплин.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XIII международном Конгрессе сталеплавильщиков (г. Полевской, 2014 г.), на I Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, 2013 г.), V Международной научно-технической конференции «Металлургические процессы и оборудование» (г. Донецк, Украина, 2013 г.), 10-ой Международной научно-технической конференции «Кадры регионам. Современная металлургия начала нового тысячелетия» (г. Липецк, 2013 г.), II Международной научно-практической конференции «Технические науки – основа современной инновационной системы» (г. Йошкар-Ола, 2013 г.), 8-й и 9-й всероссийских научно – практических конференциях (г. Старый Оскол, 2012, 2013 гг.), II Международной научно-практической конференции «Достижения и перспективы естественных и технических наук» (г. Ставрополь, 2012 г.), 71–73 международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2013–2015 гг.), 9–11 межрегиональных научно-технических конференциях «Наука и производство Урала» (г. Новотроицк, 2013–2015 гг.).

**Публикации.** По материалам диссертации имеется 18 публикаций, в том числе шесть статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и две статьи в иностранных изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Она изложена на 122 страницах машинописного текста, включая 18 таблиц, 55 рисунков и 126 источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложены актуальность темы диссертационной работы, ее цель, решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** на основе анализа литературных данных рассмотрены разновидности искажения профиля – геометрической формы поперечного сечения непрерывнолитой заготовки, вызываемые искажением профиля дефекты, причины образования и способы предотвращения. Констатируется, что искажение геометрической формы поперечного сечения – профиля чаще наблюдается на сортовых и блюмовых непрерывнолитых заготовках. Искажение профиля слябовых заготовок встречается значительно реже и, в основном, бывает вследствие выпуклости широких граней заготовки. Узкие грани подвержены образованию выпуклости в условиях недостаточной поддержки узких граней слябовой заготовки. Выпуклость граней сляба вызывает образование внутренних и поверхностных трещин, усиление химической неоднородности литого металла. Искажение профиля слябовых непрерывнолитых заготовок чаще бывает при разливке стали в короткие кристаллизаторы и особенно опасно на МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком,

так как на участке загиба могут возникнуть дефекты и аварийные прорывы металла. Основными причинами образования искажения профиля слябовой непрерывнолитой заготовки в виде выпуклости широких или узких граней являются недостаточная толщина затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора и неудовлетворительная работа поддерживающей системы на раме кристаллизатора либо ее отсутствие. Способы предотвращения искажения профиля слябов направлены на устранение причин образования дефекта формы и направлены на совершенствование температурно-скоростного режима разливки, режима охлаждения заготовки и ее поддержки в кристаллизаторе и на выходе из него.

В ОАО «Уральская Сталь» возникли проблемы с качеством слябов сечением 270×1200 мм и произведенного из них горячекатаного листа. Слябы имеют значительную выпуклость узких граней, при их отливке происходят прорывы жидкого металла, велика отсортировка листового металлопродукции по дефектам сталеплавильного происхождения даже после модернизации поддерживающей системы узких граней заготовки.

**Во второй главе** рассмотрена методика проведенных исследований. Экспериментальные исследования были проведены с использованием следующих методик: измерения параметров искажения профиля слябовой непрерывнолитой заготовки с размерами поперечного сечения 270×1200 мм; оценки качества макроструктуры и поверхности непрерывнолитых слябов; оценки качества горячекатаных листов; металлографического исследования металла аварийных чулков с изучением макроструктуры металла, а также микроструктуры металла с использованием инвертированного микроскопа серии «Olympus GX-41» и растрового электронного микроскопа «JSM-70001F»; измерения температуры поверхности слябовой заготовки в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ при помощи тепловизора «Flir T640»; определения параметров основных механических свойств литого металла в диапазоне температуры от 400 до 1400 °С на установке «Zwick/Roell Z1200 Н» для испытаний образцов на растяжение. Экспериментальные данные подвергались статистической обработке при помощи корреляционно–регрессионного анализа. В работе широко применяется проверка гипотез о равенстве дисперсий и средних значений выборок опытных данных между собой. Все виды статистической обработки данных производились на персональном компьютере в среде электронных таблиц «Excel» с использованием встроенных пакетов.

**В третьей главе** представлены результаты изучения механизма и причин образования искажения профиля непрерывнолитых слябов сечением 270×1200 мм в условиях ОАО «Уральская Сталь». Исследовано более 10 «аварийных» чулков, полученных в результате прорывов жидкого металла при входе слябовой заготовки в зону загиба технологического канала МНЛЗ

криволинейного типа с вертикальным участком. Места прорывов в виде продольных несплошностей располагались на узкой грани сляба, имевшей выпуклость 10–12 мм. Несплошности представляли собой горячие трещины, расположенные под углом примерно 45° к поверхности заготовки с науглероживанием по краям и проникновением внутрь трещин частичек шлакообразующей смеси. Причиной аварийных прорывов металла являлась недостаточная толщина затвердевшей оболочки металла на выходе из поддерживающей роликовой системы на раме кристаллизатора, вследствие чего образовывалась выпуклость узкой грани слябовой заготовки. При загибе сляба в технологическом канале МНЛЗ выпуклая оболочка не выдерживала возникающих деформационных напряжений с образованием трещин и аварийных прорывов жидкого металла.

В результате анализа 120 плавов стали марок 09Г2С, 10ХСНДА, 17Г1С была установлена зависимость степени развития дефектов слябов сечением 270×1200 мм от величины выпуклости узких граней сляба (рисунок 1).

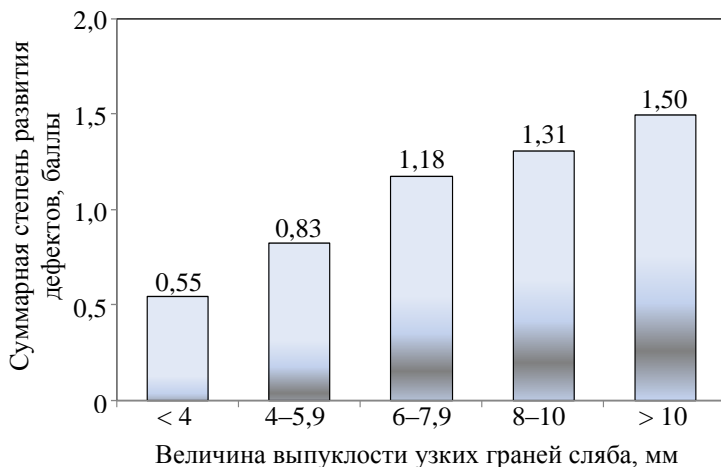


Рисунок 1 – Зависимость суммарной степени развития (усредненные значения) трещин, перпендикулярных узким граням, и угловых трещин в слябах сечением 270×1200 мм от величины выпуклости узких граней заготовки

Так в слябах с выпуклостью узких граней менее 4 мм суммарная степень развития трещин, перпендикулярных узким граням, и угловых трещин оказалась в 2,7 раза меньше, чем в заготовках с выпуклостью граней более 10 мм. При увеличении степени развития вышеназванных дефектов литой заго-

товки с 1 до 2 баллов средняя величина отсортировки толстого горячекатаного листа толщиной 8–50 мм по прикромочной рванине возрастает в 3,9 раза.

При обработке массива производственных данных из 149 плавок было подтверждено негативное влияние искажения профиля сляба сечением 270×1200 мм на качество горячекатаного листа (рисунок 2).

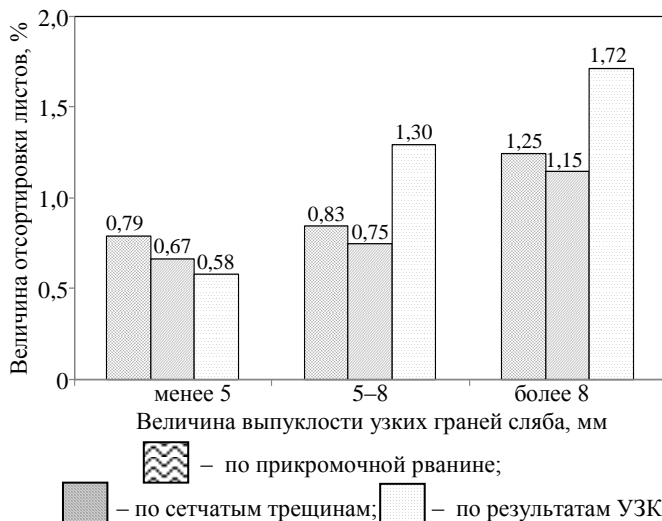


Рисунок 2 – Изменение величины отсортировки толстого горячекатаного листа, произведенного из непрерывнолитых слябов с различной выпуклостью узких граней

Проверка гипотезы о равенстве средних значений выборок с использованием критерия Стьюдента показала, что с вероятностью 95 % выпуклость узких граней сляба оказывает статистически значимое влияние на отсортировку толстого горячекатаного листа по рассмотренным видам дефектов.

Детальное исследование искажения профиля непрерывнолитых слябов с размерами поперечного сечения 270×1200 мм было проведено с использованием 300 угловых темплетов, вырезанных из заготовок. При этом было выявлено, что искажение профиля выражается не только в выпуклости узких граней заготовки, но и в вогнутости приребровой зоны широкой грани сляба (рисунок 3).

Поперечное сечение заготовки имеет выпуклость узкой грани величиной  $h_{вып}$  и вогнутость широкой грани шириной  $B_{вог}$  от угла сляба и глубиной  $h_{вог}$ . В результате изучения угловых проб металла была установлена тесная взаимосвязь между величиной выпуклости узкой грани сляба и параметрами

зоны вогнутости широкой грани заготовки, характеризуемая следующими возрастающими зависимостями:

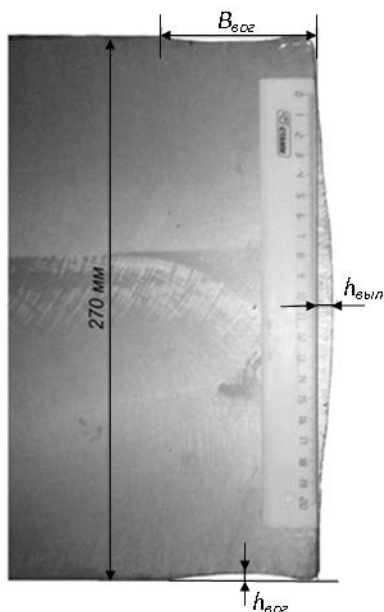


Рисунок 3 – Вид искажения профиля непрерывнолитого сляба сечением 270×1200 мм из стали марки 17Г1С

$$B_{вог} = 7,90h_{вып} + 25,11, \quad r = 0,895; \quad (1)$$

$$h_{вог} = 0,29h_{вып} - 0,46, \quad r = 0,910. \quad (2)$$

Выявленная связь между величиной выпуклости узкой грани сляба и параметрами зоны вогнутости широкой грани заготовки позволяет предположить следующий механизм формирования искажения профиля отливаемой заготовки.

Главной причиной образования такого дефекта является недостаточная толщина корочки сляба толщиной 270 мм на выходе из поддерживающей системы кристаллизатора при используемом температурно-скоростном режиме разливки.

Расчетная величина толщины корочки на выходе даже из удлиненной поддерживающей узкие грани системы при скорости вытягивания 0,9 м/мин составляет всего лишь 11,4 % от толщины заготовки, что является явно недостаточным для сохранения профиля. Для сравнения этот параметр при отливке сляба толщиной 190 мм на выходе из короткой поддерживающей системы, состоящей всего из одного ролика, при скорости вытягивания 1,25 м/мин составляет 13,7 % от толщины заготовки, обеспечивая сохранность профиля сляба.

Из-за недостаточной толщины корочки затвердевшего металла прочность затвердевшей оболочки узкой грани заготовки оказывается меньше силы давления жидкого металла. Это вызывает образование выпуклости узкой грани, которая уже не поддерживается роликами (рисунок 4). При этом происходит разворот более охлажденных ребер заготовки, имеющих большую прочность и жесткость, с образованием вогнутости прилегающего участка металла широкой грани сляба с более высокими температурой и пластическими свойствами. Предложенный механизм деформации заготовки объясняет выявленное искажение профиля сляба сечением 270×1200 мм и связанное с этим образование внутренних и поверхностных дефектов:

– выпуклость узких граней вызывает увеличение степени развития таких внутренних дефектов, как угловые и перпендикулярные граням заготовки трещины, что ведет к повышенной отсортировке листового проката по результатам ультразвукового контроля;

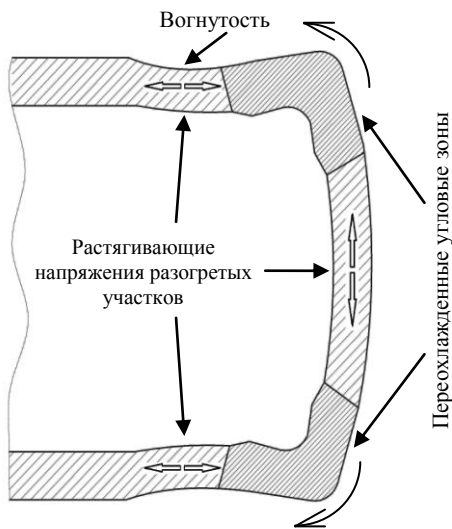


Рисунок 4 – Схема формирования искажения профиля непрерывнолитого сляба сечением 270×1200 мм

– вогнутость широких граней в приребровой зоне сляба, особенно по следам качания кристаллизатора, способствует зарождению микротрещин на поверхности отливаемой заготовки, трансформирующихся в поверхностные дефекты листового проката в виде сетчатых трещин и рванин.

Выпуклость узких граней сляба увеличивается при возрастании перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус, особенно при превышении величин 20–25 °С. При увеличении перегрева металла в среднем на 10 °С (данные по 1300

темплетам) выпуклость узких граней слябов возрастает наиболее сильно при разливке стали марки 09Г2С – примерно в 2,4 раза и несколько меньше – в 1,5 и 1,7 раза при разливке стали марок 10ХСНДА и 17Г1С. Это ведет к увеличению степени развития следующих дефектов непрерывнолитой заготовки: трещин, перпендикулярных узким граням – на 14–44 % (отн.), широким граням – на 22–28 % (отн.); осевой рыхлости – на 9–42 % (отн.); осевой трещины – на 23–33 % (отн.); осевой химической неоднородности – на 14– 47 % (отн.). Величина отсортировки толстых горячекатаных листов из стали, имевшей перегрев в промежуточном ковше МНЛЗ более 25 °С над температурой ликвидус, возрастает на 0,8–1,2 % (абс.). Основными причинами отсортировки листов являются внутренние несплошности, обнаруживаемые при ультразвуковом контроле листов, а также рванины и трещины.

На искажение профиля сляба негативное влияние оказывает несоблюдение температурно-скоростного режима разливки стали. Рабочая скорость вытягивания заготовок толщиной 270 мм, равная 0,9 м/мин, не является рациональной для предотвращения образования выпуклости узких граней заготовки даже при поддержке каждой узкой грани сляба четырьмя роликами.

Увеличение скорости вытягивания слябов толщиной 270 мм с 0,9 до 1,05 м/мин – на 17 % (отн.), вызванное производственной необходимостью, привело к возрастанию выпуклости узких граней заготовки в среднем на 40 % (отн.) и росту отсортировки толстого горячекатаного листа по рванине – на 73 % (отн.), по сетчатой трещине – на 49 % (отн.), по результатам ультразвукового контроля – на 80 % (отн.).

Увеличение длины поддерживающей системы узкой грани сляба под кристаллизатором с одного до четырех роликов привело к снижению средней величины выпуклости узкой грани на 45 % (отн.). При этом средние значения ширины и глубины зоны вогнутости приребровой части широкой грани уменьшились соответственно на 41 и 61 % (отн.). Однако в результате удлинения поддерживающей системы узких граней заготовки под кристаллизатором не удалось полностью устранить искажение профиля сляба толщиной 270 мм.

**В четвертой главе** сформулированы научно-обоснованные рекомендации для предотвращения искажения профиля непрерывнолитых слябов сечением 270×1200 мм.

В процессе анализа металла аварийных «чулков» были произведены измерения толщины корочки затвердевшего металла в местах прорывов металла. Это позволило установить зависимость коэффициента затвердевания низкоуглеродистой низколегированной стали ( $k_3$ , мм/мин<sup>0,5</sup>) от величины перегрева металла в промежуточном ковше ( $\Delta t$ , °C)

$$k_3 = 27,522 - 0,122\Delta t. \quad (3)$$

Полученная зависимость (3) была использована в расчете толщины слоя затвердевшего металла на выходе из поддерживающей узкие грани заготовки системы под кристаллизатором в слябах различной толщины. Толщина затвердевшей оболочки в слябе толщиной 190 мм оказалась на 5 мм тоньше, чем в заготовке толщиной 270 мм. Однако, относительная толщина этого слоя, выраженная в процентах от всей толщины сляба, в заготовке толщиной 190 мм была на 2,5 % больше, чем в слябе толщиной 270 мм. При разливке слябовых заготовок меньшей толщины выпучивания узких граней не происходит, в то время как слябы большей толщины практически все имеют искажение поперечного сечения. Следовательно, относительная толщина затвердевшей оболочки сляба толщиной 270 мм, средняя величина которой равнялась 11,9 %, является недостаточной. Для получения относительной толщины слоя затвердевшего металла, гарантирующей отсутствие искажение профиля сляба и равной 12,5 % (по данным Григорьева В.П., Нечкина Ю.М. и др.), была получена расчетная зависимость рациональных значений скорости вытягивания сляба толщиной 270 мм ( $w$ , м/мин) от величины перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус ( $\Delta t$ , °C)

$$w = 0,95 - 0,008\Delta t. \quad (4)$$

При перегреве металла 10–25 °С согласно зависимости (4) скорость вытягивания заготовки должна составлять 0,87–0,75 м/мин, что существенно ниже фактически используемой скорости 0,9 м/мин. Снижение скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора на одноручевой слябовой МНЛЗ вызывает прямо пропорциональное снижение производительности машины и всего электросталеплавильного цеха. Поэтому необходимо найти альтернативные решения для предотвращения искажения профиля непрерывнолитого сляба без снижения существующей рабочей скорости вытягивания.

Искажение профиля слябовой непрерывнолитой заготовки происходит вследствие недостаточной толщины слоя затвердевшего металла на выходе из поддерживающей системы. Одним из решений по увеличению толщины обложки заготовки является использование рациональной конусности плоских плит кристаллизатора. В результате экспериментов было установлено, что увеличение конусности узких плит с 1,0 до 1,1 % при повышенной скорости вытягивания слябов 1,0 м/мин позволило уменьшить величину выпуклости узких граней заготовки толщиной 270 мм в среднем на 28,6 % (отн.), то есть определенным образом компенсировать негативное воздействие повышения скорости на искажение профиля сляба. Следовательно, данный технический прием целесообразно использовать и при базовой скорости вытягивания слябов сечением 270×1200 мм, равной 0,9 м/мин. Сдерживающим моментом для этого является повышенный до 30 % (отн.) износ узких плит кристаллизатора. Таким образом, увеличение конусности узких стенок кристаллизатора с 1,0 до 1,1 %, имеющих плоскую поверхность, для снижения искажения профиля слябов сечением 270×1200 мм не может являться рациональным решением, так как ведет к снижению стойкости плит и повышению вероятности подвигания сляба. Альтернативным решением является опробование трехплоскостных узких плит, плит с параболической формой поверхности или плит с угловыми выступами.

С целью определения рациональной длины системы, поддерживающей узкие грани сляба, разработана методика, основанная на сравнении прочности затвердевшей корочки узкой грани заготовки в различных точках длины отливаемого сляба и расчетного значения распирающего давления жидкого металла на корочку. Для предотвращения выпучивания затвердевшей корочки узкой грани непрерывнолитого сляба под воздействием распирающего давления жидкого металла необходимо выполнение неравенства

$$P_{расн_i} < \sigma_{T_i}, \quad (5)$$

где  $P_{расн_i}$  – распирающее давление жидкого металла на затвердевшую корочку в центре узкой грани сляба в  $i$ -й момент времени, МПа;  
 $\sigma_{T_i}$  – условный предел текучести металла затвердевшей корочки в  $i$ -й момент времени, МПа.

В результате такого сравнения можно определить точку на технологическом канале МНЛЗ, в которой вышеназванные параметры будут иметь одинаковые значения. Следовательно, для предотвращения образования выпуклости на участке от выхода из кристаллизатора до установленной точки необходимо осуществлять роликовую поддержку узких граней отливаемой заготовки.

В ЗВО под кристаллизатором затвердевшую корочку узкой грани сляба условно можно рассматривать как балку с жестко закрепленными концами, находящуюся под равномерно распределенной нагрузкой со стороны жидкого металла. В результате действия этой нагрузки в затвердевшей корочке возникают изгибающие моменты, которые стремятся участки корочки в середине узкой грани деформировать наружу, а угловые участки – внутрь, то есть привести к искажению профиля отливаемой заготовки. Величину распирающего давления жидкого металла на затвердевшую корочку в центре узкой грани сляба можно определить из уравнения

$$P_{расп_i} = \frac{6 M_{a_i}}{\xi_i^2 \cdot h_i}, \quad (6)$$

где  $M_{a_i}$  – изгибающий момент в центре узкой грани сляба в  $i$ -й момент времени, Н·м;

$\xi_i$  – толщина затвердевшей корочки сляба в  $i$ -й момент времени, м;

$h_i$  – высота столба жидкого металла в  $i$ -й момент времени, м.

После преобразований получим формулу

$$P_{расп_i} = \frac{\rho_{жс} \cdot V_{жс_i} \cdot g \cdot (A_i - 2\xi_i)}{4(B_i - 2\xi_i) \cdot \xi_i^2}, \quad (7)$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{жс_i}$  – объем лунки жидкого металла в  $i$ -й момент времени, м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$A_i, B_i$  – толщина и ширина отливаемого сляба в  $i$ -й момент времени с учетом термического конуса, м.

Верхняя часть лунки жидкого металла в слябе, отливаемом на МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком, может быть упрощенно представлена в виде перевернутой усеченной четырехгранной пирамиды, объем которой находится по известной геометрической зависимости.

Толщину затвердевшей корочки можно определить из выражения

$$\xi_i = k_3 \cdot 10^{-3} \sqrt{h_i / w}, \quad (8)$$

где  $k_3$  – коэффициент затвердевания стали, мм/мин<sup>0,5</sup>;

$w$  – скорость вытягивания сляба из кристаллизатора, м/мин.

Величина условного предела текучести металла затвердевшей корочки в выражении (5) зависит как от химического состава стали, так и от температуры поверхностного слоя слябовой заготовки. В работе проведено исследование механических свойств металла поверхностного слоя непрерывнолитой слябовой заготовки из стали марок 09Г2С, 15ХСНД и Ст3сп в температурном диапазоне 400–1400 °С. Получены данные об изменении предела прочности и условного предела текучести металла разного состава от температуры. Для температурных условий на выходе из кристаллизатора и по длине зоны вторичного охлаждения МНЛЗ наибольший интерес представляет высокотемпературный интервал 900–1400 °С. Изменение значений условного предела текучести металла под влиянием температуры в вышеуказанном диапазоне показано на рисунке 5.

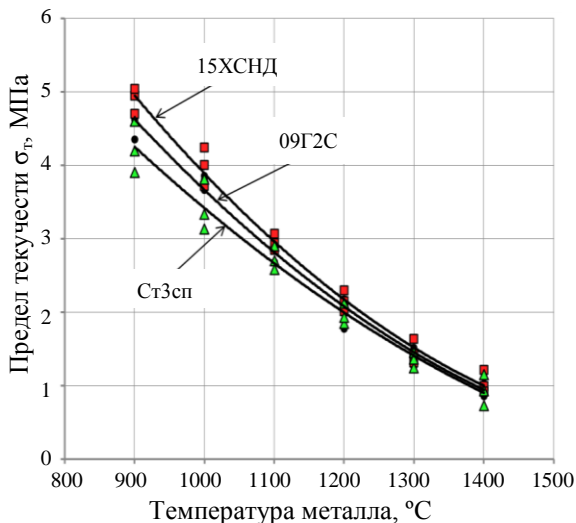


Рисунок 5 – Изменение условного предела текучести металла разного химического состава от температуры в диапазоне 900–1400 °С

При самой высокой температуре испытаний 1400 °С прочность стали всех трех марок примерно одинаковая. С понижением температуры до 900 °С различия в значениях условного предела текучести металла все более возрастают. Меньшую прочность имеет сталь марки Ст3сп, хотя в ней содержится наибольшее количество углерода. Очевидно, большая прочность стали марок 15ХСНД и 09Г2С обусловлена наличием легирующих элементов. При проведении расчетов наибольший интерес представляет прочность металла при температуре в интервале 1200–1400 °С.

Для этого интервала температур получены следующие зависимости условного предела текучести стали разных марок ( $\sigma_T$ , кПа) от температуры ( $t$ , °C):

$$09Г2С \quad \sigma_T = 0,01171t^2 - 35,433t + 27737, \quad \eta = 0,908; \quad (9)$$

$$15ХСНД \quad \sigma_T = 0,01369t^2 - 41,10t + 31793, \quad \eta = 0,929; \quad (10)$$

$$СтЗсп \quad \sigma_T = 0,01021t^2 - 31,583t + 25227, \quad \eta = 0,915. \quad (11)$$

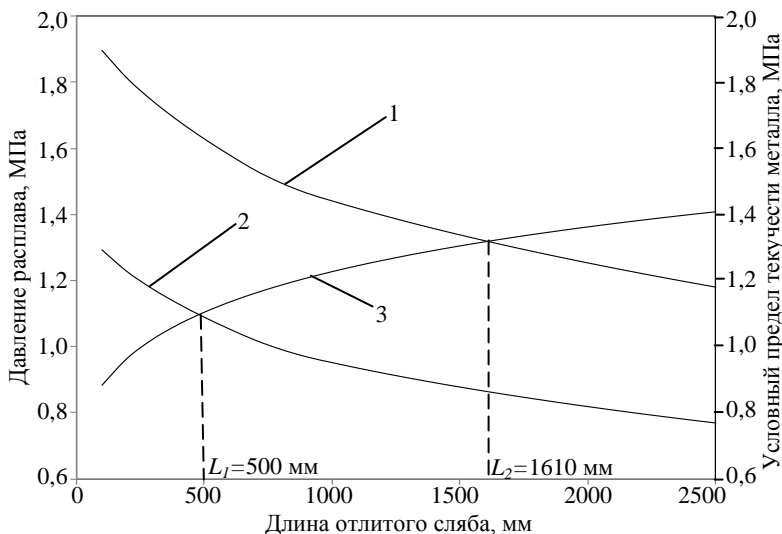
Меньшую прочность имеет сталь марки СтЗсп, поэтому определение рациональной протяженности поддерживающей системы узких граней сляба необходимо производить для условий отливки данной марки углеродистой стали. Температура металла в уравнении (11) находится как среднее значение между температурой поверхности узкой грани слябовой заготовки и температурой ликвидус разливаемой стали. Для расчета было выбрано наибольшее значение температуры ликвидус стали марки СтЗсп, равное 1518 °С. Температура поверхности центра узкой грани слябовой заготовки определялась согласно зависимости, полученной эмпирическим путем. Для этого в шести точках технологического канала МНЛЗ при разливе стали марок СтЗсп, 09Г2С и 15ХСНД десяти плавок было произведено около 180 измерений температуры поверхности узкой грани слябовой заготовки при помощи тепловизора «FLIR T640». Уравнение регрессии, описывающее изменение температуры поверхности в центре узкой грани сляба ( $t_{пов\ i}$ , °С) по длине отливной заготовки ( $l_i$ , мм) имеет следующий вид:

$$t_{пов\ i} = 1968 \times l_i^{-0,0761}, \quad \eta = 0,964. \quad (12)$$

Высокие значения корреляционного отношения (более 0,95) свидетельствуют о статистической значимости полученной зависимости.

Результаты расчета значений распирающего давления жидкого металла при отливке сляба сечением 190×1200 мм со скоростью вытягивания 1,25 м/мин и заготовки 270×1200 мм со скоростью 0,9 м/мин из стали марки СтЗсп представлены на рисунке 6. В слябе сечением 190×1200 мм затвердевшая оболочка узкой грани уже на расстоянии 500 мм от зеркала металла в кристаллизаторе способна выдерживать внутреннее давление расплава, то есть тогда, когда заготовка находится еще внутри кристаллизатора. Поэтому образования выпуклости узких граней отливаемой заготовки толщиной 190 мм не происходит. Совсем иная картина наблюдается при отливке сляба с размерами поперечного сечения 270×1200 мм. В этом случае затвердевшая оболочка узкой грани заготовки начинает выдерживать распирающее давление расплава на значительно большем удалении от зеркала металла – 1610 мм. С учетом того, что высота металла в кристаллизаторе составляет 800 мм (при высоте кристаллизатора 900 мм и уровне недолива 100 мм) длина

поддерживающей системы узких граней заготовки должна быть равна 810 мм. Существующая на раме кристаллизатора система из четырех роликов обеспечивает поддержку каждой узкой грани отливаемого сляба на расстоянии 640 мм от низа кристаллизатора, чего явно недостаточно.



- 1 – давление расплава на корочку в слябе сечением 270×1200 мм;
- 2 – давление расплава на корочку в слябе сечением 190×1200 мм;
- 3 – условный предел текучести корочки затвердевшего металла

Рисунок 6 – Изменение прочности корочки и внутреннего давления расплава на корочку узкой грани по длине слябов разного сечения из стали марки СтЗсп

Для эффективной поддержки узких граней на раму под кристаллизатором рекомендуется установить с каждой стороны по дополнительному ролику диаметром 130 мм и удлинить систему охлаждения по торцам заготовки. В работе произведена оценка экономической эффективности внедрения поддерживающей системы рациональной длины. В результате предотвращения искажения профиля непрерывнолитых слябов сечением 270×1200 мм вдвое снизится отсортировка горячекатаного листа по рванине, сетчатым трещинам, результатам ультразвукового контроля и ожидаемый экономический эффект составит 5,73 млн. рублей в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Степень развития внутренних дефектов непрерывнолитого сляба сечением  $270 \times 1200$  мм: трещин, перпендикулярных узким граням и угловых трещин, а также отсортировка толстого горячекатаного листа по прикромочной рванине, сетчатым трещинам, результатам ультразвукового контроля листов возрастают при увеличении выпуклости узких граней непрерывнолитых заготовок.
2. Искажение профиля слябовой непрерывнолитой заготовки, формирующейся в условиях недостаточной поддержки узких граней, проявляется не только в их выпуклости, но и в вогнутости прикромочной зоны широких граней. Между выпуклостью узкой грани непрерывнолитой заготовки, а также шириной и глубиной зоны вогнутости в приребровой части широкой грани существуют возрастающие линейные зависимости. Предложен механизм формирования искажения профиля непрерывнолитого сляба сечением  $270 \times 1200$  мм.
3. Причиной искажения профиля сляба является недостаточная толщина затвердевшей оболочки металла на выходе из поддерживающей роликовой системы на раме кристаллизатора. Выпуклость узких граней сляба увеличивается при возрастании перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус, особенно при превышении величин  $20\text{--}25$  °С, при несоблюдении температурно-скоростного режима разливки стали. Рабочая скорость вытягивания заготовок  $0,9$  м/мин не является рациональной для предотвращения образования выпуклости узких граней заготовки даже при поддержке каждой узкой грани сляба четырьмя роликами
4. Для предотвращения искажения профиля слябовой заготовки сечением  $270 \times 1200$  мм определены рациональные параметры температурно-скоростного режима разливки стали. Однако рекомендуемое снижение скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора на одноручевой слябовой МНЛЗ вызывает прямо пропорциональное снижение производительности машины и всего электросталеплавильного цеха.
5. Увеличение конусности узких стенок кристаллизатора с  $1,0$  до  $1,1$  %, имеющих плоскую поверхность, ведет к уменьшению выпуклости узких граней слябов сечением  $270 \times 1200$  мм, но сопровождается снижением стойкости плит и повышением вероятности подвисания сляба. Рекомендуется опробование трехплоскостных узких плит, плит с параболической формой поверхности, плит с угловыми выступами.
6. Разработана методика определения рациональной длины поддерживающей системы узких граней сляба, основанная на сравнении прочности затвердевшей корочки узкой грани заготовки в различных точках длины отливаемого сляба и расчетного значения распирающего давления жидкого металла на корочку.

7. В результате исследования механических свойств металла поверхностного слоя непрерывнолитой слябовой заготовки из стали марок 09Г2С, 15ХСНД и СтЗсп установлены закономерности изменения предела прочности и условного предела текучести литого металла в высокотемпературном диапазоне 900–1400 °С.

8. По разработанной методике определена рациональная протяженность поддерживающей системы, расположенной на раме кристаллизатора, для предотвращения образования выпуклости узких граней слябовой заготовки с размерами поперечного сечения 270×1200 мм в условиях ОАО «Уральская Сталь» и даны рекомендации по изменению поддерживающей системы.

9. Ожидаемый экономический эффект от внедрения поддерживающей системы рациональной длины составит 5,73 млн. рублей в год вследствие предотвращения искажения профиля непрерывнолитых слябов сечением 270×1200 мм и снижения вдвое отсортировки горячекатаного листа по рванине, сетчатым трещинам и результатам ультразвукового контроля.

**Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

1. **Шевченко, Е.А.**, Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – №1 (41). – С. 27–30 (рекомендовано ВАК).

2. **Шевченко, Е.А.** Проблемы получения качественной слябовой заготовки на МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь» / Е.А. Шевченко, А.Н. Шаповалов // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2013. – №1. – С. 68–73 (рекомендовано ВАК).

3. **Шевченко, Е.А.** Изучение искажения поперечного сечения непрерывнолитого сляба / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – №1. – С. 34–37 (рекомендовано ВАК).

4. **Шевченко, Е.А.** Методика определения рациональной длины поддерживающей системы узких граней непрерывнолитого сляба для предотвращения выпучивания / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – №3(47). – С. 32–36 (рекомендовано ВАК).

5. **Шевченко, Е.А.** Искажение профиля непрерывнолитого сляба в условиях ОАО «Уральская Сталь» / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Metallургические процессы и оборудование. – 2014. – №1(35). – С. 13–18 (рекомендовано ВАК).

6. **Шевченко, Е.А.** О рациональной длине поддерживающей системы узких граней непрерывнолитой заготовки для предотвращения выпуклости /

- Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – №1. – С. 39–43 (рекомендовано ВАК).
7. **Shevchenko, E.A.** Transverse distortion of continuous-cast slab / E.A. Shevchenko, A.M. Stolyarov, A.N. Shapovalov, K.V. Baranchikov // Steel in Translation. – 2014. – Т. 44. – № 1. – P. 17–20.
8. **Shevchenko, E.A.** Preventing convexity at the narrow faces of continuous-cast billet / E.A. Shevchenko, A.M. Stolyarov, A.N. Shapovalov, K.V. Baranchikov // Steel in Translation. – 2015. – Т. 45. – № 1. – P. 29–32.
9. **Шевченко, Е.А.** Влияние температуры разливаемого металла на качество непрерывнолитого сляба и листового проката / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2012. – Вып.12. – С. 68–74.
10. **Шевченко, Е.А.** Влияние температурного режима разливки стали на выпуклость узких граней непрерывнолитых слябов / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Сборник трудов девятой региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов. – Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС. – 2013. – С. 97–99.
11. **Шевченко, Е.А.** Изучение влияния выпуклости узких граней непрерывнолитых слябов на качество листового проката / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2013. – Вып.12. – С. 129–134.
12. **Шевченко, Е.А.** Улучшение качества узких граней слябовой непрерывнолитой заготовки / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Наука и производство Урала: межрегион. сб. научн. тр. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС». – 2013. – Вып.9. – С. 57–61.
13. Шаповалов, А.Н. Рациональная длина поддерживающей системы узких граней непрерывнолитого сляба для условий ОАО «Уральская Сталь» / А.Н. Шаповалов, **Е.А. Шевченко**, А.М. Столяров // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 38–42.
14. **Шевченко, Е.А.** Влияние искажения профиля на внутреннее строение непрерывнолитого сляба и качество горячекатаного листа / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Кадры регионам. Современная металлургия нового тысячелетия: сб. 10-ой Международной научно-технической конференции. Часть 2. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2013. – С. 73–80.
15. **Шевченко, Е.А.** Анализ влияния технологических параметров разливки стали на качество непрерывнолитого сляба и листового проката / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // Теория и технология металлургического производства. – 2013. – №1(13) . – С. 21–23.

16. **Шевченко, Е.А.** Изучение механических свойств поверхностного слоя непрерывнолитой слябовой заготовки / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – №2. – С. 38–41.
17. **Шевченко, Е.А.** Изучение влияния химического состава и температуры на механические свойства непрерывнолитой стали / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 72–й международной научно–технической конференции* / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд–во Магнитогорск. гос. техн. ун–та им. Г.И. Носова. – 2014. – Т.1. – С. 205–209.
18. **Шевченко, Е.А.** Исследование искажения профиля непрерывнолитого сляба толщиной 270 мм в условиях ОАО «Уральская Сталь» / Е.А. Шевченко, А.М. Столяров, А.Н. Шаповалов и др. // *Сборник трудов XIII международного Конгресса сталеплавильщиков: ООО «Эзапринт»*. – 2014. – С. 340–344.