

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 38

Москва
Новокузнецк
2017

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 38 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2017 – 230 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 45, табл. 28, библиогр. назв. 222.

Редакционная коллегия: Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ
АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Базайкин В.И.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Галевский Г.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Деев В.Б.	д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Дорофеев В.В.	д-р техн. наук, АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Оршанская Е.Г.	д-р пед. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Селянин И.Ф.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Темлянцева М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	8
<i>Чжан Кэ</i>	
Проектно-исследовательский институт цветной металлургии Китая: научно-технологический потенциал, проектирование, строительство, инжиниринг, рециклинг горно-металлургических, энергетических и водохозяйственных объектов	9
<i>И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, И.Т. Амонов, Н.Р. Эсанов</i>	
Влияния щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe в нейтральной среде	13
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании	22
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на организацию предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей	30
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на управление процессом зародышеобразования в производстве окатышей, основанном на принудительном зародышеобразовании	37
<i>В.Б. Деев, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева</i>	
Влияние железа на характер кристаллизации, литейные и механические свойства заэвтектического силумина	43
<i>М.В. Темлянецев, К.С. Коноз, О.В. Кузнецова, Э.Я. Живаго, В.Я. Целлермаер</i>	
Исследование высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 40С2 и особенностей строения ее окарины	48
<i>А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.В. Добрянский</i>	
Совершенствование режимов прокатки острых рельсов на универсальном рельсобалочном стане	55
<i>Е.С. Прусов, В.Б. Деев</i>	
Перспективы применения ультразвука при вводе наночастиц в алюминиевые расплавы	64
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев, С.Н. Кратько, Р.Е. Крюков</i>	
Поиск оптимальных технологических параметров режима работы рельсосварочной машины К1000	70
<i>Р.А. Шевченко, С.Н. Кратько, П.Е. Шишкин, Н.А. Козырев, В.И. Базайкин</i>	
Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине К1000	76
<i>Р.А. Шевченко, В.И. Базайкин, С.Н. Кратько, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев</i>	
Анализ токового режима работы сварочной машины К1000 при сварке рельсов на этапе оплавления	81
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	88
<i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>	
Термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония	89
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова</i>	
Исследование механизма плазмосинтеза диборида титана	97

А.А. Уманский¹, В.В. Дорофеев², А.В. Головатенко², В.Н. Кадыков¹,
А.В. Добрянский²

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

² АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк

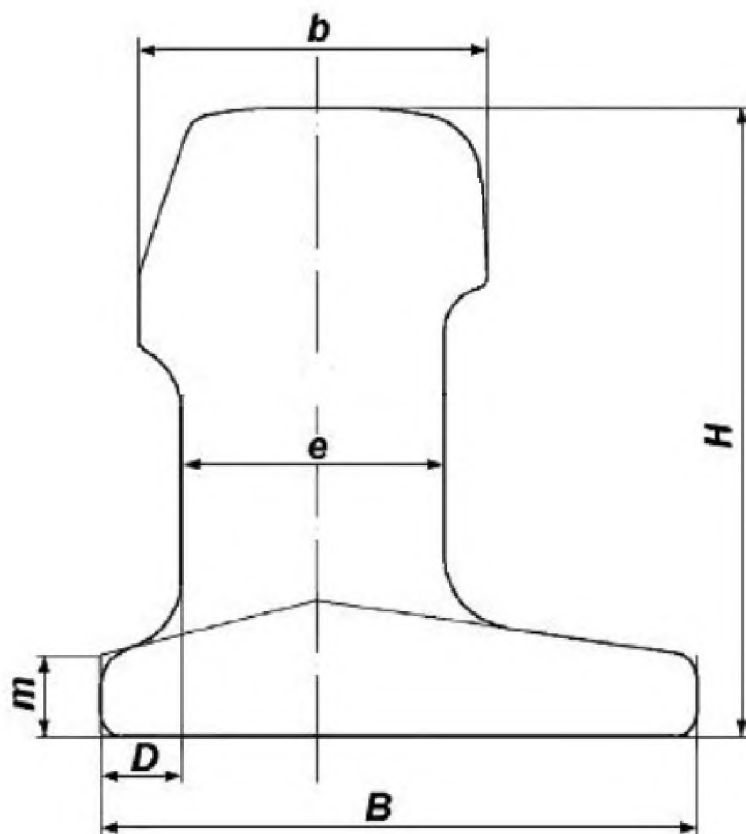
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ОСТРЯКОВЫХ РЕЛЬСОВ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ РЕЛЬСОБАЛОЧНОМ СТАНЕ

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан новый способ прокатки остряковых рельсов ОР65, внедрение которого на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило повысить производительность стана на 39,8 т/час и уменьшить отбраковку готовых рельсов по пленам прокатного происхождения на 0,5 %. Экономическая эффективность от внедрения нового режима прокатки составила 29,7 млн. руб/год.

Based on the results of theoretical and experimental studies, a new method for rolling the switchgear rails OR65 has been developed. Its introduction on the universal rail mill of «EVRAZ ZSMK» allowed to increase the mill's productivity by 39.8 t/h and to reduce the rejection of finished rails by 0.5 %. Economic efficiency from the introduction of the new rolling regime amounted to 29.7 million rubles per year.

В последние годы наблюдается четко выраженная тенденция к повышению требований к качеству железнодорожных переводов, что обусловлено увеличением скорости движения железнодорожных поездов [1-3]. Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что основными причинами брака при изготовлении остряковых переводов являются неудовлетворительная геометрия и разброс величин остаточных напряжений в исходных заготовках – остряковых рельсах [4]. Поэтому улучшение качества остряковых рельсов на сегодняшний день является актуальной задачей.

Профиль рельса острякового имеет ярко выраженную асимметричную форму (рисунок 1), что обуславливает значительные трудности при освоении производства таких профилей на современных универсальных рельсобалочных станах. Приведенный тезис подтверждается практическим опытом освоения производства остряковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), имеющем в своем составе две последовательно расположенные двухвалковые реверсивные обжимные клетки (BD1 и BD2) и смещенный относительно линии прокатки универсальный тандем-стан, состоящий из двух универсальных и одной вспомогательной двухвалковой клетки, а также отдельно расположенной чистовой универсальной клетки (рисунок 2).



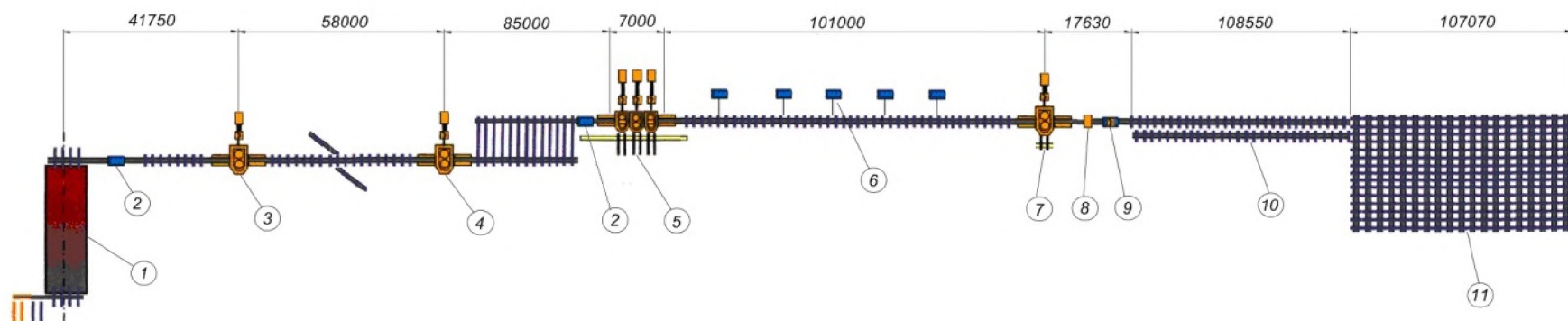
H – высота рельса; b – ширина головки; e – толщина шейки;
 B – ширина подошвы; D – ширина короткого плеча подошвы;
 m – высота пера подошвы

Рисунок 1 – Профиль поперечного сечения остряковых рельсов

В соответствии с контрактной калибровкой поставщика оборудования рельсобалочного стана (компании «SMS Meer») схема прокатки остряковых рельсов типа ОР65 включала в себя следующие основные этапы:

- семь проходов в ящичных калибрах клетки BD1 с получением прямоугольного подката;
- пять проходов в клетки BD2, в том числе первый проход – в калибре «лежачая трапеция», второй и третий проходы – в калибре «стоячая трапеция», четвертый проход – в разрезном рельсовом калибре закрытого типа, пятый проход – в подготовительном рельсовом калибре открытого типа;
- прокатку в клетях тандем-стана за три прохода, в том числе – первый проход в универсальной клетке UR и вспомогательной (эджерной) клетке E, второй проход – в клетке UR; третий проход – последовательно во всех трех клетях тандем-стана (UR, E, UF).

Практический опыт производства остряковых рельсов по вышеописанной схеме позволил выявить ряд ее значительных недостатков:



- 1 – нагревательная печь; 2 – устройство гидросбива окалины;
 3, 4 – обжимные клетки BD1 и BD2; 5 – тандем-группа клеток;
 6 – пилы горячей резки; 7 – чистовая клеть; 8 – лазерный профилемер;
 9 – клеймитель; 10 – участок дифференцированной закалки;
 11 – участок холодильника

Рисунок 2 – Схема расположения оборудования универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

1. При прокатке в клети BD2 имело место скручивание раскатов на выходе из калибров, что значительно затрудняло или, в ряде случаев, делало невозможной задачу раската в последующий калибр. Попытки решения указанной проблемы за счет внедрения прокатки с принудительной задачей раската в калибры (прокатка с «затравкой») приводили к значительному повышению отбраковки рельсов по дефекту «плена», а также – к увеличению цикла прокатки в клети BD2.

2. В закрытом ручье разрезного рельсового калибра происходило интенсивное налипание металла по периметру стенок, что являлось следствием значительной разности в диаметрах валков, а именно разности окружных скоростей по элементам калибра. При этом указанная разница в диаметрах валков создавалась искусственно с целью уменьшения изгиба переднего конца раската в сторону закрытого ручья калибра, происходящего вследствие значительного защемления раската в закрытых фланцах. Такой режим прокатки приводил к повышению частоты аварийных ситуаций. Имевшее место налипание металла на прокатные валки обуславливало дополнительные текущие простои прокатного стана, а также увеличение количества дефектов типа «плена» и «отпечаток» на готовых рельсах.

С целью устранения указанных недостатков на первом этапе провели корректировку схемы прокатки остряковых рельсов путем ввода двух дополнительных проходов – в разрезном рельсовом калибре закрытого типа и в открытом рельсовом калибре (рисунок 3 а). Разрезка раската за два прохода и два прохода в открытом рельсовом калибре обеспечили прямолинейный выход раскатов из этих калибров без операции «затравки», что позволило значительно снизить количество дефектов в виде плен прокатного происхождения.

Однако, несмотря на то, что усовершенствование технологии прокатки рельсов остряковых привело к ощутимым преимуществам при их производстве по сравнению с контрактной схемой прокатки, увеличение количества проходов в клети BD2 приводило к снижению производительности стана.

Для устранения указанных недостатков был разработан новый способ прокатки рельсов остряковых с интенсифицированным режимом обжатий в клети BD1, уменьшенным количеством проходов в клети BD2 и применением разрезного рельсового наклонного калибра с разъемами по диагонали взамен разрезного рельсового калибра закрытого типа (рисунок 3 б). Возможность интенсификации режима деформации в клети BD1 была обоснована предварительными расчетами усилия прокатки в ящичных калибрах этой клети (рисунок 4). При проведении расчетов использовали ранее разработанную методику определения сопротивления рельсовой стали пластическому деформированию [5-9].

В результате внедрения нового режима прокатки рельсов ОР65 за счет снижения количества проходов в клети BD2 достигнуто уменьшение

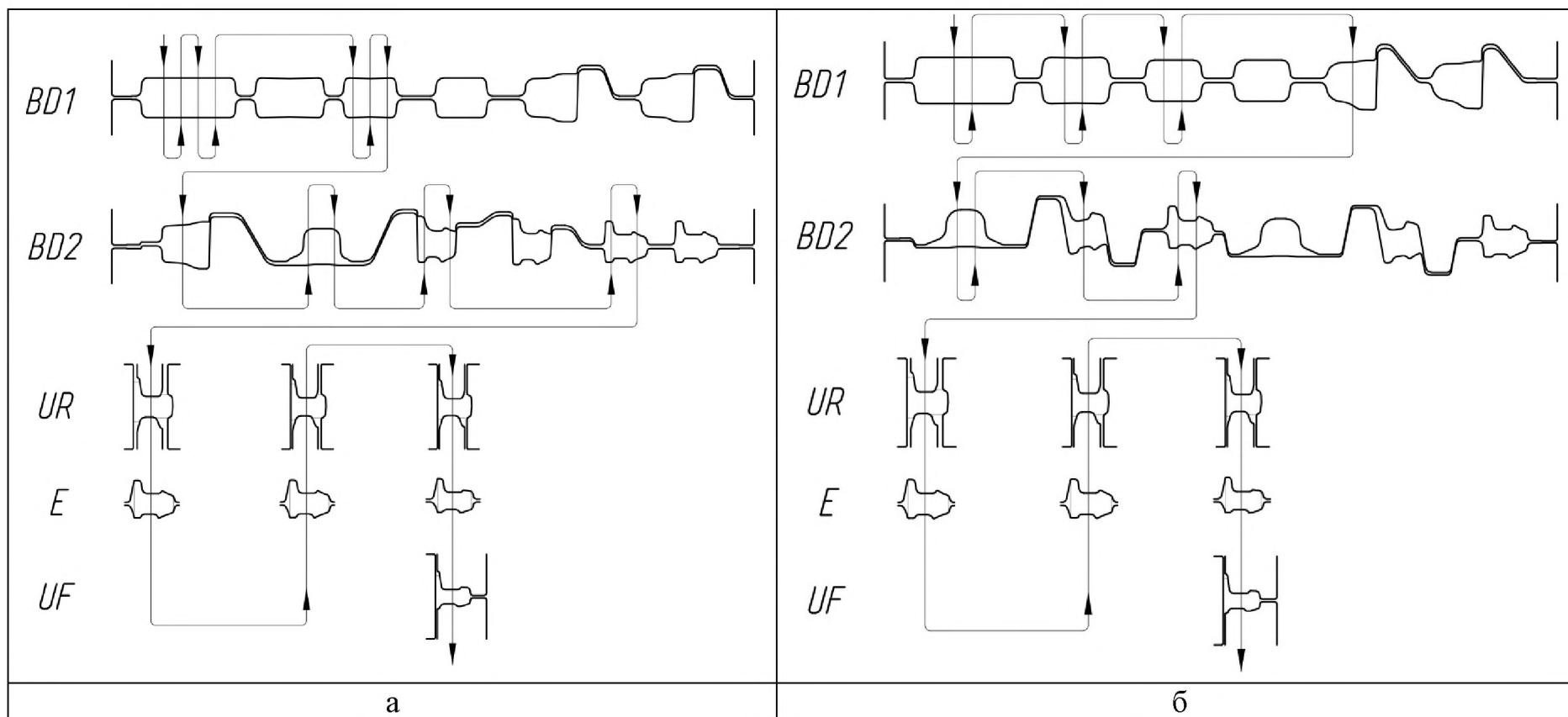


Рисунок 3 – Контрактная (а) и усовершенствованная (б) схема прокатки острых рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

цикла прокатки на 22,5 с, что обусловило повышение производительности стана при производстве данного вида продукции на 39,8 т/час. Экономический эффект от повышения производительности стана составил 29,7 млн. руб./год.

Кроме того, использование наклонного расположения рельсового калибра позволило:

- обеспечить возможность переточки валков без изменения ширины калибров;
- повысить интенсивность обжатия;
- устранить опасность окова валков раскатом вследствие диагонального расположения закрытых и открытых фланцев;
- облегчить за счет большого выпуска задачу раската в валки;
- сконструировать калибры в валках по нейтральной линии калибра, (с одинаковым диаметром нижнего и верхнего валков).

По фактическим данным облегчение условий задачи раската в валки при использовании нового режима прокатки позволило снизить отбраковку готовых рельсов ОР65 по дефекту «плена» на 0,5 %.

Согласно разработанной схеме прокатки контроль ширины фланцев подошвы и головки профиля раската после первого и третьего четырехвалкового калибров производится во вспомогательных открытых двухвалковых калибрах эджерной клетки. Окончательное же оформление профиля

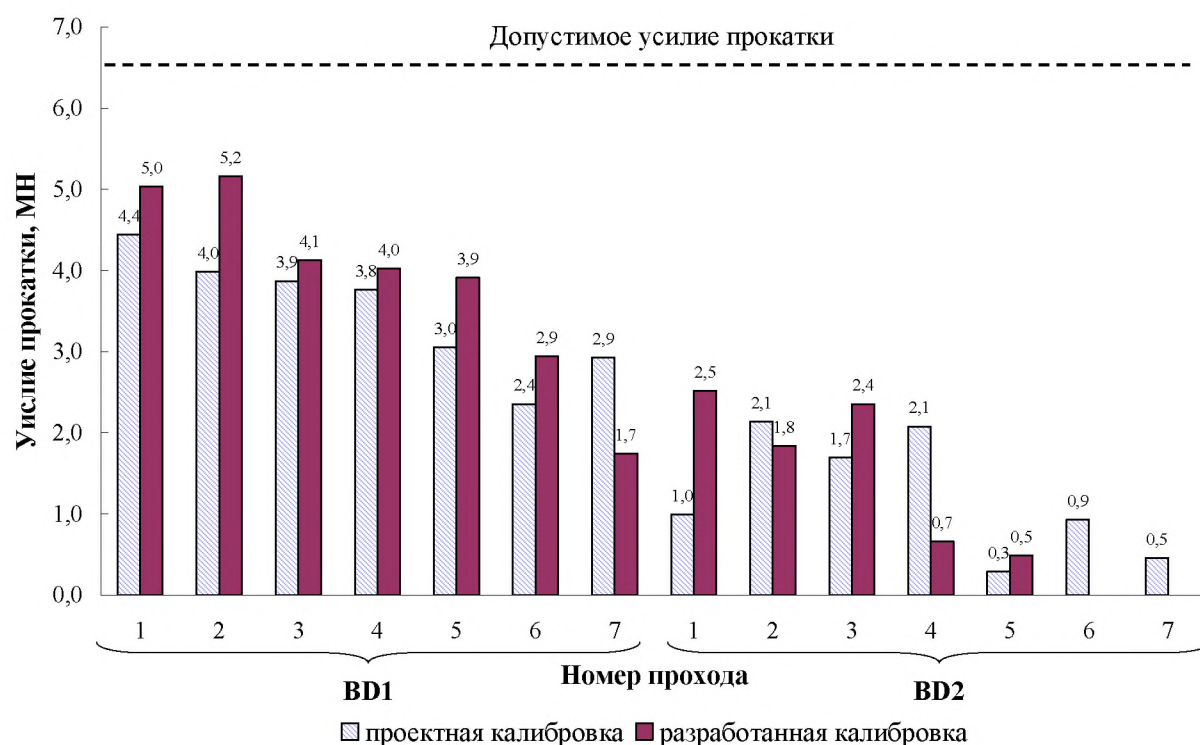


Рисунок 4 – Расчетные усилия прокатки при деформации в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

острякового рельса осуществляется в трехвалковом чистовом универсальном калибре. Ручьи данного калибра, формирующие головку рельса, конструируются по тем же правилам, что и для двухвалковых чистовых калибров с разъемом валков посередине поверхности катания головки профиля, а подошва – формируется в трехвалковом участке калибра, где размер ширины подошвы выполняется за счет свободного уширения металла в разъемах валков (рисунок 5 а). Соответственно уширение короткого и длинного плеча подошвы профиля (ΔB_ϕ) складывается из естественного уширения (ΔB_e), вследствие основного обжатия этих элементов в калибре, и вынужденного уширения, которое появляется в результате дополнительного обжатия местных наплывов металла у вершин короткого и длинного плеча подошвы (ΔB_b), получающихся при деформации этих элементов во вспомогательных калибрах горизонтальной эджерной клетки:

$$\Delta B_\phi = \Delta B_e + \Delta B_b \quad (1)$$

$$\Delta B_e = \frac{2,54 \cdot \Delta t \cdot (\varepsilon_\phi - \varepsilon_{ш})}{\varepsilon_\phi} \quad (2)$$

$$\Delta B_b = \frac{k \cdot \Delta H \cdot t'}{\lambda \cdot t} \quad (3)$$

где $\Delta t = t' - t$ – среднее обжатие фланца по толщине; ε_ϕ и $\varepsilon_{ш}$ – относительное обжатие фланцев и шейки соответственно; $\varepsilon_\phi = \Delta t$; $\varepsilon_{ш} = d' - d$; $\Delta H_\phi = H'_\phi - H_\phi$ – обжатие фланцев по высоте во вспомогательной клетке; λ – коэффициент вытяжки в универсальном калибре; k – коэффициент, учитывающий долю металла, идущего на уширение фланца (принимается 0,5 для черновых клетей и 0,7 – для чистовых клетей).

Формирование подошвы острякового рельса в трехвалковом участке калибра позволяет ликвидировать присущий прокатке в двухвалковом калибре (рисунок 5 б) момент, вызываемый защемлением металла в закрытом верхнем фланце калибра, формирующем длинное плечо подошвы рельса (M_3), совпадающий с направлением скручивающего момента (M_C), вызываемого различием скоростей по периметру чистового калибра рельса острякового (рисунок 5 а) и уменьшить скрученность при выходе из валков.

Вместе с тем следует отметить ограничения, присущие разработанному режиму прокатки остряковых рельсов в условиях универсального рельсобалочного стана. Как показано выше окончательное формирование профиля рельсов в чистовом универсальном калибре вертикальным роликом и боковыми поверхностями ручьев горизонтальных валков предусматривает оформление ширины подошвы профиля за счет свободного уширения металла при деформации этого элемента (рисунок 5 а). В результате выполнение размера ширины подошвы профиля в чистовом калибре осу-

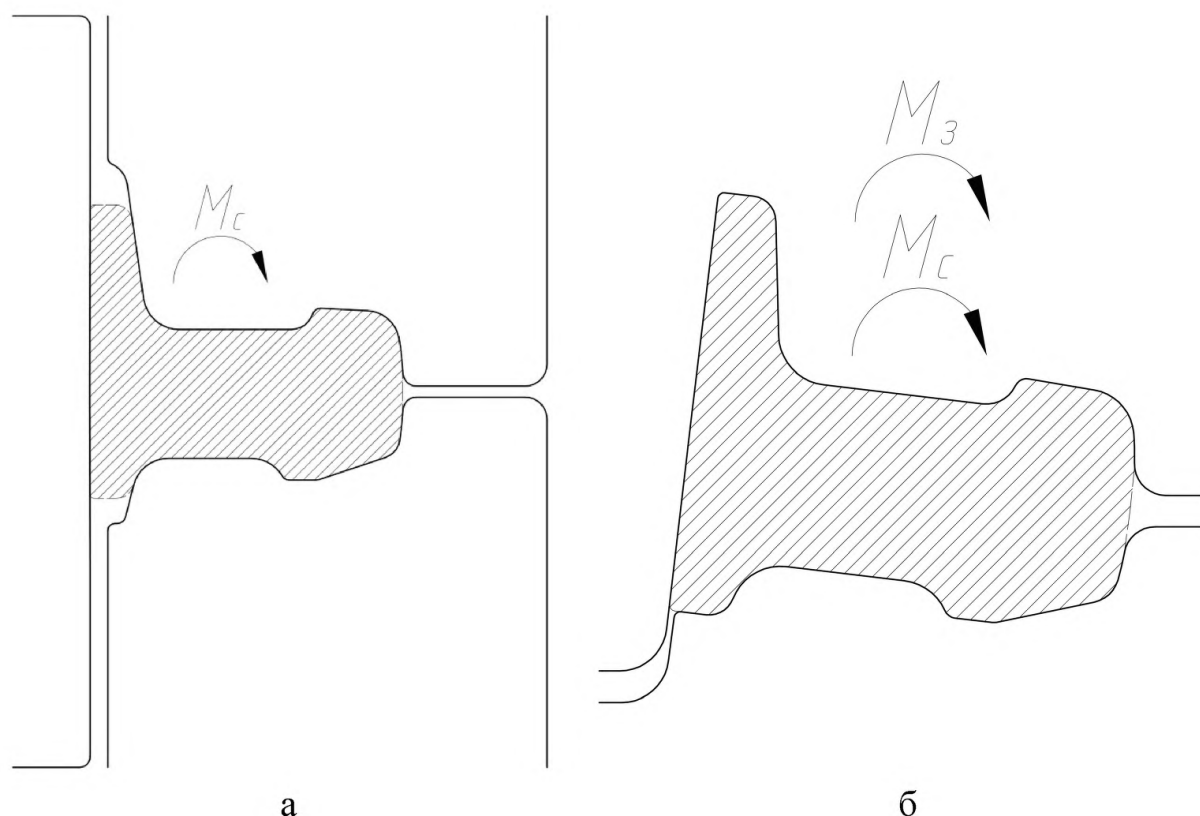


Рисунок 5 – Общий вид универсального трехвалкового (а) и чистового двухвалкового (б) калибров для прокатки рельсов острьяковых

ществляется не инструментом, а свободным уширением металла, которое зависит от многих технологических параметров и не может быть предварительно спрогнозировано с высокой степенью точности. В связи с этим закономерно возникают затруднения при выполнении требований нормативной документации по точности выполнения размеров элементов профиля. Имеющиеся производственные данные отечественных и зарубежных металлургических предприятий позволяют говорить о достижимой точности размеров элементов прокатных профилей, получаемых горячей прокаткой при наличии в схеме прокатки свободного уширения металла, величиной $\pm 1,0$ мм. Данный факт подтверждается также требованиями, установленными зарубежной нормативной документацией. При этом согласно действующего отечественного ГОСТ Р 55820–2013 предельные допуски на ширину короткого плеча подошвы для классов точности изготовления профиля «высший сорт» (X) и «первый сорт» (Y) установлены в пределах $\pm 0,3$ мм и $\pm 0,5$ мм соответственно. В соответствии с вышеизложенным, выполнение данного требования представляется невозможным, что требует внесения корректив в действующую нормативно-техническую документацию на производство рельсов острьяковых.

Выводы: На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан новый способ прокатки остряковых рельсов ОР65, внедрение которого на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило повысить производительность стана и улучшить качество поверхности рельсовых профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свейковски У. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий Rail Cool. Металлургическое производство и технология (МРТ) / У. Свейковски, Т. Нерзак // Черные металлы. – 2006. – № 2. – С. 50-56.
2. Никитина Л.А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом. Ч. IV / Л.А. Никитина // Производство проката. – 2000. – № 11. – С. 2-10.
3. Смирнов В.К. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях / В.К. Смирнов, А.Р. Бондин, А.М. Михайленко // Производство проката. – 2002. – № 12. – С. 24-30.
4. Коган А.Г. Перспективы повышения качества остряковых рельсов / А.Г. Коган, Е.А. Шур // Сборник трудов юбилейной рельсовой комиссии ОАО «КМК» – Новокузнецк, 2002. – С. 42-48.
5. Уманский А.А. Разработка методики прогнозирования сопротивления деформации рельсовой стали при изменяющихся условиях прокатки / А.А. Уманский, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УпФУ, 2015. – С. 199-202.
6. Головатенко А.В. Исследование сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных условиях прокатки / А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.А. Уманский // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2014. – Вып. 33. – С. 64-71.
7. Головатенко А.В. Разработка модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных температурно-скоростных параметрах деформации / А.В. Головатенко, А.А. Уманский, В.Н. Кадыков // Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество. Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2014. – С. 160-165.
8. Уманский А.А. Анализ и разработка универсальной математической модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при прокатке / А.А. Уманский, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. Сборник научных

трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции. – Белгород, 2014. – Ч. I. – С. 182-187.

9. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 150 (2016). 012029.

УДК 621.74

Е.С. Прусов¹, В.Б. Деев²

¹ФГБОУ ВО «ВлГУ», г. Владимир

²ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ВВОДЕ НАНОЧАСТИЦ В АЛЮМИНИЕВЫЕ РАСПЛАВЫ

В статье изложены особенности использования метода ультразвуковой обработки расплавов при получении алюмоматричных нанокомпозитов жидкофазными методами. Описан механизм влияния ультразвуковых колебаний на распределение наночастиц в объеме расплава и приведены практические примеры синтеза нанокомпозитов с применением ультразвука.

The paper describes the features of application of ultrasonic melt treatment at producing of aluminum matrix nanocomposites by liquid-phase methods. The mechanism of influence of ultrasonic waves on distribution of nanoparticles in the melt volume and practical examples of nanocomposites synthesis using ultrasound are given.

Алюмоматричные композиты, армированные наночастицами, имеют значительный потенциал для использования при изготовлении различных объектов современной техники, обладая такими ценными свойствами, как высокая удельная прочность, малая плотность, высокая демпфирующая способность, хорошие технологические свойства, низкий коэффициент термического расширения и высокая теплопроводность, высокая несущая способность, износостойкость, жаростойкость и др. [1]. Реализация принципа армированной гетерофазной структуры, положенного в основу создания композиционных материалов с нано- и микроразмерными армирующими наполнителями в виде высокомодульных тугоплавких частиц кера-