



Оригинальная статья

УДК 621.71

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-381-389

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2318>



ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВ С УСКОРЕНИЕМ

В. Н. Соловьев, Е. С. Белолипецкая

Липецкий государственный технический университет (Россия, 398055, Липецк, ул. Московская, 30)

Аннотация. В статье рассматривается новый температурно-скоростной режим прокатки длинномерных рельсов. Рельсы длиной до 50 м прокатывали на линейных станах. Производство рельсов большей длины потребовало использования заготовок большей массы и оборудования новой конструкции. На современных рельсобалочных станах количество клетей увеличено, часть клетей объединена в непрерывную группу, универсальные клетки стали применять не только в качестве калибрующих. Рельсы длиной 100 м прокатывают из заготовок большой массы на станах с непрерывной реверсивной группой универсальных клетей. Существенная длина заготовки приводит к образованию «температурного клина» – снижению температуры по длине рельсов во время прокатки в последней клетке стана. Расчет показан, что снижение температуры по длине рельсов может приводить к увеличению их высоты. Аналогичная проблема существует и при производстве тонкого листового проката на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки. Прокатка раската в чистовой группе клетей с ускорением позволяет сократить время остывания заднего участка раската и разогреть металл за счет более интенсивной деформации. Ускорение выбирается таким, чтобы на выходе из чистовой группы клетей температура полосы была одинаковой по всей длине. В настоящей работе предлагается прокатка рельсов с ускорением, которое должно обеспечивать одинаковую температуру шейки по длине рельсов в последней клетке стана, что снизит разность высоты по длине проката. Одинаковая высота рельсов по длине уменьшит затраты на шлифовку и ускорит монтаж, тем самым повысит потребительский спрос и конкурентоспособность рельсов.

Ключевые слова: длинномерные рельсы, реверсивная группа прокатных клетей, ускорение, температурный клин, высота рельсов

Для цитирования: Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С. Прокатка длинномерных рельсов с ускорением // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 381–389. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-381-389>

Original article

ROLLING OF LONG-LENGTH RAILS WITH ACCELERATION

V. N. Solov'ev, E. S. Belolipetskaya

Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya Str., Lipetsk 398055, Russian Federation)

Abstract. The article explains a new temperature-speed mode of rolling long-length rails. Rails up to 50 m long were rolled on linear mills. The production of rails of longer length required the use of larger mass billets and equipment of a new design. At the modern rail-beam rolling mill, the number of stands has increased and some of the stands are combined into a continuous group. Universal rolling stands began to be used not only as calibration stands. Rails with a length of 100 m are rolled from large-mass billets on mills with a continuous reversible group of universal stands. A significant length of the billet leads to the formation of a «temperature wedge» – a decrease in temperature along the length of the rail during rolling in the last stand of the mill. The calculation showed that a decrease in temperature along the rail length can lead to an increase in its height. A similar problem existed in the production of thin sheet metal at continuous broadband hot rolling mill. Rolling the rolled metal in the finishing group of stands with acceleration made it possible to reduce the cooling time of rear section of the rolled metal and warm up the metal due to more intense deformation. The acceleration value is chosen such that at the exit from the finishing group of stands, temperature of the strip is the same along the length of the strip. In this paper, rolling rails with acceleration is proposed. The acceleration value should ensure the same neck temperature along the length of the rail in the mill last stand, which will reduce the height difference along the length of the rolled product. The same rails height along the length will reduce the cost of grinding and accelerate the rail laying, thereby increasing consumer demand and competitiveness of the product.

Keywords: long-length rails, continuously reversible group of rolling stands, acceleration, temperature wedge, rail height

For citation: Solov'ev V.N., Belolipetskaya E.S. Rolling of long-length rails with acceleration. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 381–389. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-381-389>

ВВЕДЕНИЕ

Основу железнодорожной сети России составляют рельсы Р65. Рельсы длиной 12,5 и 25,0 м производятся на станах линейного типа. Например, рельсобалочный

стан 900/800 состоит из четырех двух- и трехвалковых клетей, расположенных в три линии. Масса заготовки составляет около 3,5 т. Из заготовки получают прокат длиной до 50 м, который затем разделяют пилами на рельсы требуемой длины [1].

Для производства рельсов длиной 100 м и более требуется заготовка большей массы. Длительность прокатки возрастает, что не позволяет получать требуемую температуру конца прокатки. Рельсы длиной 100 м прокатывают на станах с непрерывной группой клетей [2], которая сокращает пространство, занимаемое оборудованием стана, снижает потери тепла заготовки во время прокатки, что позволяет обеспечить требуемую температуру конца прокатки. В состав стана входит шесть клетей: черновая обжимная клеть; обжимная клеть; непрерывная реверсивная группа из трех клетей и калибровочная клеть¹ [3, 4].

На стане с непрерывной группой клетей обеспечиваются температурные режимы прокатки рельсов [5]. Черновую прокатку проводят в температурном интервале 950 – 1100 °С с коэффициентом вытяжки за проход в пределах 1,12 – 1,30. Чистовую прокатку проводят в температурном интервале 850 – 1000 °С с коэффициентом вытяжки в универсальных калибрах в пределах 1,07 – 1,18. Далее проводят финишную прокатку в отдельно стоящей универсальной нереверсивной калибровочной клетей в температурном интервале 820 – 880 °С с коэффициентом вытяжки в пределах 1,07 – 1,10 [6]. Затем осуществляют дифференцированное охлаждение по головке и подошве рельсов от 720 – 870 до 450 – 600 °С [7 – 9]. В результате получают рельсы повышенной износостойкости и контактной выносливости [10 – 12].

Финишную прокатку в отдельно стоящей универсальной нереверсивной калибровочной клетей проводят для соблюдения прямолинейности и обеспечения требуемых геометрических размеров профиля рельсов по всей их длине в заданном диапазоне допусков.

Прокатка длинномерных рельсов в непрерывной группе клетей имеет свои особенности. Деформация происходит в универсальной клетей, что обуславливает сложности формировании сечения в коробчатых закрытых несимметричных рельсовых калибрах [13 – 15].

¹ SMS-group. LONG PRODUCTS BULLETIN. EDITION. 2016. URL: <https://www.sms-group.com/press-media/media/downloads/download-detail/download/15926> (Дата обращения: 21.12.2021).

Следует учитывать влияние соседних клетей и деформации в универсальной клетей. Важно обеспечить температуру конца прокатки в заданном интервале по всей длине рельсов.

ОБРАЗОВАНИЕ РАЗНОСТИ ВЫСОТЫ

ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ

В качестве примера современного стана по производству рельсов большой длины рассмотрим рельсовый стан компании АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК), который является одним из крупнейших производителей всей номенклатуры рельсового сортамента не только в России, но и в мире. Основным поставщиком рельсовой продукции для ОАО «Российские железные дороги» является АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [16, 17]. После реконструкции в одном цехе производятся все виды рельсов: магистральные, трамвайные, подкрановые, остряковые, для метрополитена. Также возможности нового прокатного стана позволяют производить продукцию строительного сортамента: балки, швеллеры, шпунты, квадратную и круглую заготовки.

На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» выпускаются рельсы железнодорожные широкой колеи Р65 дифференцированно термоупрочненные с прокатного нагрева длиной 12,5, 25,0 и 100,0 м, рельсы категории ДТ350СС – рельсы с улучшенными геометрическими параметрами для движения поездов со скоростью до 250 км/ч [18].

Состав оборудования стана включает обжимную и черновую клетей, непрерывную реверсивную трехклетевую группу клетей и чистовую универсальную клетей. В состав непрерывной группы входят две универсальные клетей (рис. 1, где I – реверсивная обжимная клетей; II – черновая реверсивная клетей; III – непрерывная реверсивная группа клетей; IV – калибровочная нереверсивная клетей; УК1 – первая универсальная клетей; ВК – вспомогательная клетей; УК2 – вторая универсальная клетей; УКЗК – универсальная калибровочная клетей) [16]. Последняя клетей стана используется как калибровочная.

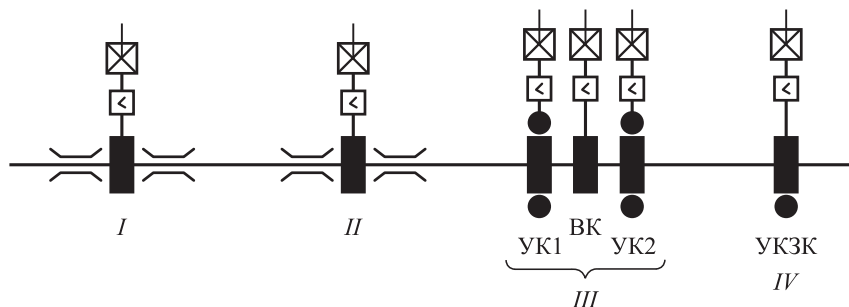


Рис. 1. Последовательность расположения прокатных клетей рельсобалочного стана

Fig. 1. Sequence of rolling stands of the rolling mill

На валках обжимной клетки BD1 расположены три тавровых калибра, а также ящичные калибры для получения из исходной непрерывнолитой заготовки раската прямоугольного сечения, задаваемого в первый тавровый калибр. В черновой клетке BD2 проводится разрезка полученного таврового профиля в закрытом разрезном калибре и дальнейшая прокатка в закрытом рельсовом калибре, а далее в открытом рельсовом калибре с целью получения профиля симметричного относительно горизонтальной оси прокатки в универсальных клетях.

В непрерывной реверсивной группе клеток прокатка проводится за три прохода. В первом проходе используется универсальная клетка УК1 и вспомогательная клетка ВК, у которой на линии прокатки установлен черновой контрольный калибр для обжатия высоты фланцев, полученных в УК1. Клетка УК2 не участвует в прокатке: ее валки автоматически разводятся нажимным устройством, пропуская раскат без обжатия.

После реверса стана клетка ВК выводится с линии прокатки, во втором проходе раскат получает обжатие только в клетке УК1. В третьем проходе (после поджатия валков в клетках УК1 и УК2) используются все три клетки непрерывной группы, причем во вспомогательной клетке на линию прокатки устанавливается предчистовой контрольный калибр. Таким образом, раскат получает четыре прохода в универсальных клетях и два прохода в контрольных калибрах вспомогательной клетки. В клетке УК3К проводится за один проход горячее калибрование готового профиля, благодаря чему повышается точность и достигается стабилизация размеров рельсов по длине, устраняется малейшая несимметричность профиля и снижается расход металла.

Для высокоскоростных железных дорог требуются рельсы с высокой точностью геометрических размеров, для обеспечения которой на современных станах используются универсальные клетки не только в качестве последней чистовой клетки, но и как промежуточные.

Важным параметром является высота рельсов. Особенно это актуально для рельсов длиной 100 м. Рельсы большой длины служат основой бесстыкового пути и соединяются сваркой. Отклонения сварных стыков рельсов от прямолинейности в виде горбов по поверхности катания головки в вертикальной плоскости и по боковой рабочей грани головки в горизонтальной плоскости на длине 1 м после шлифования не должны превышать 0,2 мм для железнодорожных путей скоростного и высокоскоростного движения² [19 – 23].

При более высоком отклонении высоты на стыке при сваривании двух рельсов образуется небольшое возвышение, которое в процессе эксплуатации способ-

ствует появлению вмятины. Для того, чтобы устранить разность высоты, рельсы шлифуют в месте стыка после сварки. Если разность высоты присутствует на всех рельсах, то шлифовку приходится проводить на всех стыках, что требует больших затрат. Использование калибровочной клетки существенно снижает расход металла и затраты на строительство железных дорог.

На размеры готовой рельсовой продукции оказывает влияние не только точность и форма калибров, схема калибровки (последовательность деформации в калибрах), но и температурные условия получения размеров рельсов.

Прокатка основной части заготовки во всех клетях непрерывной реверсивной группы клеток ведется с постоянной скоростью. В частности, в начале третьего прохода передний конец раската проходит межклетевые промежутки с постоянной, заправочной скоростью прокатки, соответствующей моменту времени окончания разгона валков и начала захвата металла валками при частоте вращения валков n_{y1}, n_{y2}, n_{y3} (рис. 2, а, где n_{y1}, n_{y2}, n_{y3} – частота вращения валков в момент захвата раската; n_{n1}, n_{n2}, n_{n3} – частота вращения валков в период прокатки основной части раската; n_{s1}, n_{s2}, n_{s3} – частота вращения валков в момент выпуска раската; τ_{p1} – время разгона валков клетки УК1 до скорости захвата; τ_y – время разгона непрерывной группы клеток до рабочей скорости; τ_{n1} и τ_{ny1} – время прокатки основной части раската с постоянными скоростью и ускорением; τ_z – время замедления непрерывной группы клеток до скорости выпуска раската; τ_{zn1} – время прокатки раската с заправочной скоростью в клетке УК1; τ_{m3} – время прокатки раската в клетке УК2 до момента выпуска раската из клетки УК1; $\tau_{вп3}$ – время выпуска раската из непрерывной группы; τ_{o3} – время торможения клетки УК2 до остановки; $\tau_{ост}$ – время паузы на реверс клеток; T_3 – время третьего прохода).

Разгон валков с раскатом до рабочей скорости начинается одновременно во всех трех клетях группы после того, как передний конец раската с заправочной скоростью пройдет все межклетевые промежутки и достигнет последней клетки. Скорости по клетям различаются пропорционально коэффициентам вытяжки раската в клетях.

При достижении рабочей скорости (n_{n1}, n_{n2}, n_{n3}) по клетям прокатка основной части раската проводится с постоянной скоростью. Замедление валков с раскатом начинается одновременно во всех клетях группы после окончания прокатки с максимальной скоростью в первой клетке.

Во время прокатки металл раската остывает. Существенная длина заготовки для производства рельсов длиной 100 м приводит к образованию «температурного клина» – снижению температуры по длине рельсов во время прокатки в клетке УК3К.

Образование «температурного клина» обусловлено более длительным охлаждением заднего конца раската (по сравнению с передним) перед последним проходом.

² Положение о системе ведения рельсового хозяйства ОАО «РЖД». Утверждено распоряжением № 2334р ОАО «РЖД» от 31 октября 2013 г. URL: <https://mooml.com/d/otraslevye-i-vedomstvennye-normativno-metodicheskie-dokumenty/proektirovanie-i-stroitelstvo-zheleznikh-dorog/34228/> (Дата обращения: 07.11.2021).

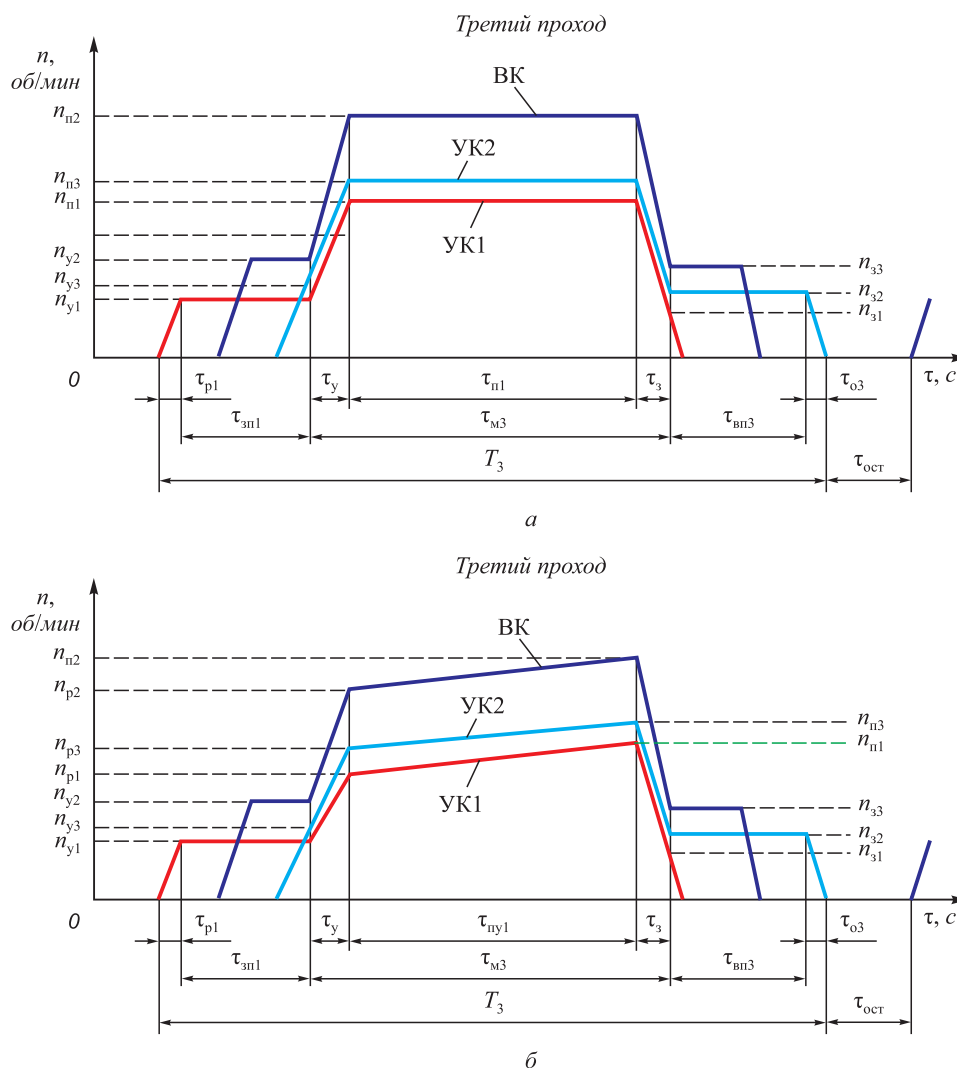


Рис. 2. Режим прокатки основной части рельса с постоянной скоростью (а) и с ускорением (б)

Fig. 2. Rolling mode of the rail main part at constant speed (a) and with acceleration (b)

Определение изменения температуры элементов рельсов по клетям стана проводится методами математического моделирования [24 – 27]. Расчет в разных сечениях позволяет оценить изменение температуры по длине проката (рис. 3). Для рассматриваемого состава оборудования и схемы прокатки рельсов различие температуры (ΔT) шейки по длине проката может составлять 75 °С в калибровочной клет.

Образующаяся разность температур раската сохраняется и на готовой продукции. Следовательно, в калибровочной клеті получаем одинаковый размер, но при разных температурах. При охлаждении переднего и заднего концов раската разность температур может приводить к образованию разности высоты рельсов.

Определим разность высоты по длине по разности температур шейки, так как основную долю в высоте составляет шейка рельсов. Рельсы для высокоскоростных железных дорог производятся из стали марки 76ХФ, коэффициент теплового расширения α составляет $14,8 \cdot 10^6$ 1/°С [28]. Высота H рельсов Р65 составляет

180 мм [29]. Разность высоты шейки по длине рельсов составит [30]:

$$\Delta H = H \alpha \Delta T = 180 \cdot 14,8 \cdot 10^6 \cdot 75 = 0,1998 \text{ мм.}$$

Разность высоты переднего и заднего концов рельсов близка к предельно допустимой 0,2 мм. Следует стремиться к устранению разности высоты по длине; получение одинаковой высоты профиля по длине позволит:

- уменьшить затраты на шлифовку стыков;
- ускорить монтаж рельсового пути;
- повысить потребительский спрос и конкурентоспособность рельсов длиной 100 м для высокоскоростных железных дорог.

Для устранения разности высоты по длине рельсов необходимо исключить разность температуры по длине. Иными словами, нужно изменить технологию прокатки так, чтобы температура на всех участках рельсов по длине была одинакова для повышения точности размеров.

МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КЛИНА

Аналогичная проблема существует и при производстве листового проката. Для устранения температурного клина используется прокатка с ускорением в чистовой непрерывной группе клетей при прокатке слябов большой массы [31, 32]. При этом сокращается время нахождения заднего конца раската на промежуточном рольганге и происходит разогрев металла из-за большей скорости деформации.

Например, в состав оборудования непрерывного широкополосного стана горячей прокатки полос 2000 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) входит двенадцать клетей, разделенных на две группы: черновую и чистовую. Черновая включает пять последовательно расположенных клетей, а чистовая – семь клетей, образующих непрерывную группу. Черновая и чистовая группы клетей разделены промежуточным рольгангом, на котором умещается раскат.

На непрерывном широкополосном стане горячей прокатки (НШСП) нагретый в печах сляб прокатыва-

ют в черновой группе клетей до промежуточной толщины раската и транспортируют его к чистовой непрерывной группе по промежуточному рольгангу. Затем раскат задают в чистовую группу клетей, где обжимают в полосу заданной толщины [33]. Прокатанная полоса по отводящему рольгангу транспортируется к группе моталок, где сматывается в рулон.

При движении по промежуточному рольгангу раскат остывает. Причем задний конец полосы остывает дольше, чем передний, что приводит к уменьшению температуры конца прокатки от переднего конца к заднему по длине полосы [34 – 37]. Такое снижение температуры конца прокатки по длине полосы от переднего к заднему концу принято называть «температурным клином», для устранения которого используется прокатка с ускорением в чистовой непрерывной группе клетей при прокатке слябов большой массы. При этом сокращается время нахождения заднего конца раската на промежуточном рольганге и происходит разогрев металла из-за большей скорости деформации. При производстве тонких полос деформация по коэффициенту вытяжки находится в интервале от 7 до 10.

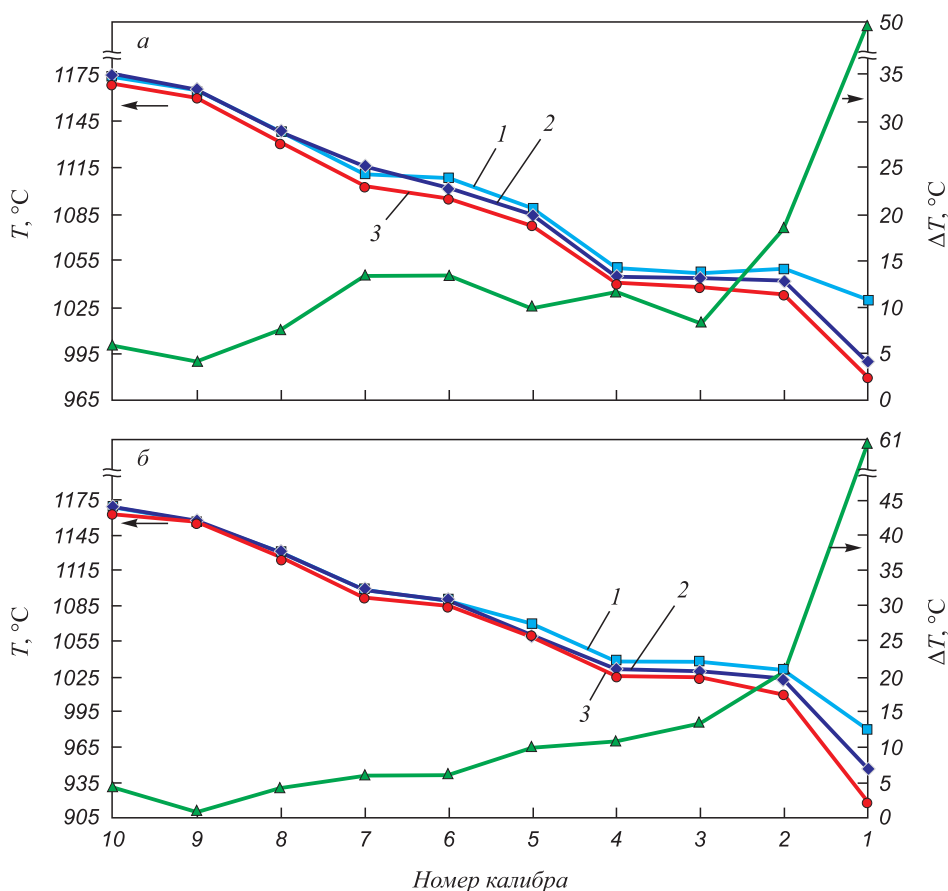


Рис. 3. Изменение среднемассовой температуры (ΔT) и температур элементов рельсового профиля в поперечных сечениях передней (а) и задней (б) частей раската:
1 – головка; 2 – подошва; 3 – шейка

Fig. 3. Change in the average mass temperature (ΔT) and temperatures of the rail profile elements in cross sections of the front (a) and rear (b) parts of the rolled metal:
1 – head; 2 – base; 3 – neck

Температуру конца прокатки поддерживают одинаковой по длине полосы во время прокатки. Вначале прокатку ведут с заправочной скоростью, обеспечивающей получение требуемой температуры конца прокатки на переднем конце полосы. После выхода переднего конца полосы из чистовой группы (или после заправки полосы в моталку) скорость прокатки постепенно увеличивается, обеспечивая постоянную по длине полосы температуру конца прокатки.

Прокатку с ускорением можно использовать и при производстве длинномерных рельсов: ускорение должно обеспечивать одинаковую температуру по длине рельсов в последней клетке стана. Однако прокатка рельсов с ускорением в непрерывной реверсивной группе клеток имеет существенное отличие от способа прокатки полос с ускорением в непрерывной группе клеток: невозможно получить одинаковую температуру по поперечному сечению изделия. Полоса в сечении представляет собой прямоугольник, температура по сечению которого примерно одинакова. Рельсы имеют сложное строение поперечного сечения. Рельсы в поперечном сечении состоят из трех элементов: головки, шейки и подошвы. Каждый элемент имеет разные размеры и охлаждается с разной скоростью, что делает получение одинаковой температуры в поперечном сечении невозможным. Кроме того, получение одинаковой температуры конца прокатки по длине полос происходит не только за счет сокращения времени нахождения заднего конца раската на промежуточном рольганге, но и разогрева металла из-за большей скорости деформации. Рельсы являются объемными, поэтому разогрев от деформации и снижение температуры элементов не могут быть одинаковыми. Именно поэтому термин «температура конца прокатки» для рельсов не применим без уточнения температуры конца прокатки шейки.

Технически прокатку с ускорением можно реализовать следующим образом (рис. 2, б, где n_{p1} , n_{p2} , n_{p3} – частота вращения валков в период начала прокатки основной части раската с ускорением). Вначале заполнение непрерывной группы проходит обычным образом. Передний конец раската проходит межклетевые промежутки с постоянной, заправочной скоростью прокатки, соответствующей моменту времени окончания разгона валков и начала захвата металла валками при частоте вращения n_{y1} , n_{y2} , n_{y3} . Разгон валков с раскатом до рабочей скорости начинается одновременно во всех клетях группы после того, как передний конец раската с заправочной скоростью пройдет все межклетевые промежутки и достигнет последней клетки. Скорости по клетям различаются пропорционально коэффициентам вытяжки раската в клетях.

В отличие от применяемого скоростного режима прокатки рабочая скорость n_{p1} , n_{p2} , n_{p3} меньше максимально возможной n_{n1} , n_{n2} , n_{n3} . От рабочей скорости до максимальной прокатка основной части раската проводится с ускорением, обеспечивающим по длине рельсов «обратный температурный клин» по температуре шейки (увеличение температуры по длине проката от переднего конца к заднему концу рельсов). Ускорение и рабочая скорость выбираются таким образом, чтобы к окончанию прокатки основной части раската скорость равнялась максимально возможной. Замедление валков с полосой до скорости выпуска раската n_{31} , n_{32} , n_{33} должно начинаться одновременно во всех клетях группы после окончания прокатки с максимальной скоростью в первой клетке.

Максимальная скорость прокатки определяется технической возможностью стана и условием обеспечения требуемой температуры конца прокатки рельсов. Ожидаемое ускорение на основе опыта прокатки толстых полос на НШСГП [39] составляет 0,005 – 0,010 м/с². Обратный температурный клин должен обеспечивать одинаковую температуру шейки по длине рельсов (температуру конца прокатки) в калибровочной клетке для получения одинаковой высоты по длине.

Можно использовать (при технической возможности) прокатку с ускорением и в калибровочной клетке. Такая прокатка сократит время остывания заднего конца раската перед клетью и позволит уменьшить ускорение в последнем проходе в чистовой непрерывной реверсивной группе клеток. Режим прокатки рельсов с ускорением применим при различных схемах калибровки валков клеток и стана в целом.

Выводы

Основная часть длины рельсов в непрерывной группе клеток рельсобалочного стана прокатывается с постоянной скоростью. При этом на входе в калибровочную клетку формируется «температурный клин», который приводит к образованию разности высоты переднего и заднего концов рельсов. Следует стремиться к устранению разности температуры по длине, что технически можно сделать за счет прокатки с ускорением в непрерывной группе клеток. Такая прокатка обеспечит одинаковую температуру шейки по длине в последней клетке стана. Можно использовать прокатку с ускорением и в калибровочной клетке. Получение рельсов с одинаковой по длине высотой профиля позволит уменьшить затраты на шлифовку стыков, ускорить монтаж рельсового пути, повысить потребительский спрос и конкурентоспособность рельсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства. М.: Металлургия, 1994. 656 с.
2. Mauk P.J., Overhagen C., Stellmacher U. Development of rolling technology in the long products sector // *Stahl und Eisen*. 2010. Vol. 130. No. 6. P. 24–39.
3. Wang C., Ma Z., Li Y., Zeng J., Jin T., Liu H. Distortion calibrating method of measuring rail profile based on local affine invariant feature descriptor // *Measurement*. 2017. No. 110. P. 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.015>
4. Головатенко А.В., Уманский А.А., Дорофеев В.В. Основные тенденции развития рельсопрокатного производства в России и за рубежом. В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XIX Международной научно-практической конференции, 15–16 декабря 2015 г. Часть 1. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. С. 10–16.
5. Белолипецкая Е.С., Соловьев В.Н. Развитие оборудования для производства рельс высокоскоростных железных дорог. В кн.: Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук. Липецк, 15 ноября 2019 г. Липецк: изд. Липецкого государственного технического университета, 2019. С. 9–12.
6. Пат. 2743534 С1 РФ. Способ изготовления железнодорожных рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости / Е.В. Полевой, Г.Н. Юнин, Е.П. Кузнецов, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко; опубл. 19.02.2021. Бюл. № 5.
7. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Темлянтsev М.В. Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 10. С. 704–714. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-10-704-714>
8. Masoumi M., Tressia G., Centeno D.M.A., Goldenstein H. Improving the mechanical properties and wear resistance of a commercial pearlitic rail steel using a two-step heat treatment // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2021. Vol. 52. No. 11. P. 4888–4906. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06432-0>
9. Юрьев А.Б., Юнин Г.Н., Головатенко А.В., Дорофеев В.В., Полевой Е.В. Разработка и внедрение первой в России технологии производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Сталь*. 2016. № 11. С. 33–35.
10. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact // *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. Part 2. P. 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.012>
11. Sen P.K., Bhiwapurkar M., Harsha S.P. Rolling contact fatigue behavior of rail weldments under various load conditions: in Indian railways aspect // *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2020. Vol. 10. No. 3. P. 10205–10212.
12. Dong Y.G., Zhang W.Z., Cao H. Determination of forward slip coefficient during heavy rail rolling using universal mill // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2008. Vol. 15. No. 2. P. 32–38. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60027-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60027-8)
13. Dong Y.G., Zhang W.Z., Song J.F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 1. P. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
14. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar' E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill // *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. No. 3–4. P. 260–266. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0284-9>
15. Gelder S., Buchmayr B., Linzer B., Hohenbichler G. Physical simulation of the hot direct rolling of steel // *Steel Research International*. 2011. Vol. 82. No. 10. P. 1213–1219. <https://doi.org/10.1002/srin.201000298>
16. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорофеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию
1. Grudev A.P., Mashkin L.F., Khanin M.I. *Technology of Rolling Production*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 656 p. (In Russ.).
2. Mauk P.J., Overhagen C., Stellmacher U. Development of rolling technology in the long products sector. *Stahl und Eisen*. 2010, vol. 130, no. 6, pp. 24–39.
3. Wang C., Ma Z., Li Y., Zeng J., Jin T., Liu H. Distortion calibrating method of measuring rail profile based on local affine invariant feature descriptor. *Measurement*. 2017, no. 110, pp. 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.015>
4. Golovatenko A.V., Umanskii A.A., Dorofeev V.V. Main trends in development of rail rolling production in Russia and abroad. In: *Proceedings of the XIX Int. Sci. and Pract. Conf. "Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality". December 15–16, 2015. Part 1*. Novokuznetsk: PC SibSIU, 2015, pp. 10–16. (In Russ.).
5. Belolipetskaya E.S., Solov'ev V.N. Development of equipment for production of high-speed rail. In: *Materials of the Regional Profile Seminar "School of Young Scientists" on the Problems of Technical Sciences, November 15, 2019, Lipetsk*. Lipetsk State Technical University, 2019, pp. 9–12. (In Russ.).
6. Polevoi E.V., Yunin G.N., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Golovatenko A.V. *Method for manufacturing railway rails of increased wear resistance and contact endurance*. Patent RF no. 2743534 C1. *Byulleten' izobretenii*. 2021, no. 5. (In Russ.).
7. Polevoi E.V., Yunin G.N., Temlyantsev M.V. Development and commercial introduction of technology for differentiated heat treatment of railway rails with rolling heat utilization. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 10, pp. 704–714. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-10-704-714>
8. Masoumi M., Tressia G., Centeno D.M.A., Goldenstein H. Improving the mechanical properties and wear resistance of a commercial pearlitic rail steel using a two-step heat treatment. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2021, vol. 52, no. 11, pp. 4888–4906. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06432-0>
9. Yur'ev A.B., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Dorofeev V.V., Polevoi E.V. Development and implementation of the first technology in Russia for production of differential heat-strengthened rails using rolling heat. *Stal'*. 2016, no. 11, pp. 33–35. (In Russ.).
10. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact. *International Journal of Fatigue*. 2016, vol. 83, part 2, pp. 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.012>
11. Sen P.K., Bhiwapurkar M., Harsha S.P. Rolling contact fatigue behavior of rail weldments under various load conditions: in Indian railways aspect. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2020, vol. 10, no. 3, pp. 10205–10212.
12. Dong Y.G., Zhang W.Z., Cao H. Determination of forward slip coefficient during heavy rail rolling using universal mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2008, vol. 15, no. 2, pp. 32–38. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60027-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60027-8)
13. Dong Y.G., Zhang W.Z., Song J.F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 1, pp. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
14. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar' E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3–4, pp. 260–266. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0284-9>
15. Gelder S., Buchmayr B., Linzer B., Hohenbichler G. Physical simulation of the hot direct rolling of steel. *Steel Research International*. 2011, vol. 82, no. 10, pp. 1213–1219. <https://doi.org/10.1002/srin.201000298>
16. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of a universal rail-

- универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 32–38.
17. Юрьев А.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубаникова Ю.А. Структура и свойства длинномерных дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации. Екатеринбург: Полиграфист, 2020. 253 с.
18. Friebe G., Guriev S., Pittman R., Shevyakhova E., Tomová A. Rail-road restructuring in Russia and central and eastern Europe: one solution for all problems? // *Transport Reviews*. 2007. Vol. 27. No. 3. P. 251–271. <https://doi.org/10.1080/01441640600979502>
19. ТУ 0921-323-01124323-2012. Рельсы железнодорожные типа Р65 категории ДТ370ИК производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», сваренные электроконтактным способом.
20. Абдурашитов А.Ю., Кузнецов С.В. Влияние неровностей на поверхности катания рельсов на уровень взаимодействия пути и подвижного состава // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2018. Т. 13. № 13 (13). С. 103–114.
21. Алехин А.Л., Блашко Л.С., Никеров Н.С. Прогнозирование одиночного выхода рельсов, сваренных алюминотермитным способом // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2011. № 4 (29). С. 23–29.
22. Andersson R., Torstensson P.T., Kabo E., Larsson F. The influence of rail surface irregularities on contact forces and local stresses // *Vehicle System Dynamics. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2015. Vol. 53. No. 1. P. 68–87. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.982890>
23. Крысанов Л.Г. Об установлении геометрических нормативов коротких вертикальных неровностей на рельсах для скорости 250 км/ч // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2009. № 1. С. 15–21.
24. Guo Y.J., Xie Z.J., Wang Y.Z., Tao G.M. Multiplex analytical method for metal three-dimensional flow of heavy rail rolling by universal mill // *Chongqing Daxue Xuebao*. 2010. Vol. 33. No. 1. P. 31–35.
25. Pei N.N., Zhu G.M., Li B., Tao G.M., Kang Y.L. 3D thermo-mechanical coupled simulation of whole rolling process for 60 kg/m heavy rail // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014. Vol. 21. No. 12. P. 1104–1110. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60190-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60190-4)
26. Dong Y.G., Zhang W.Z., Song J.F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 1. P. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
27. Скосарь Е.О., Шилов В.А., Шварц Д.Л. Исследование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане // *Производство проката*. 2012. № 11. С. 7–11.
28. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
29. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.
30. Белоліпецкая Е.С., Соловьев В.Н. Технологическая причина различия размеров концов рельс длиной 100 метров. В кн.: *Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук*. Липецк, 16 октября 2020 г. Липецк: изд. Липецкого государственного технического университета. 2020. С. 23–26.
31. Технология прокатного производства. Т. 2 / М.А. Беньковский, К.Н. Богоявленский, А.И. Виткин, Э.А. Гарбер, С.А. Голованенко, Н.Ф. Грицуц, В.Т. Жадан, Ю.Д. Железнов, В.И. Зюзин, Н.В. Литовченко, А.И. Молчанов, А.Н. Петичев, П.И. Лопухин, М.М. Сафьян, А.В. Третьяков. М.: Металлургия, 1991. 423 с.
32. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. СПб.: Лань, 2020. 528 с.
33. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips // *Frattura ed*
- rolling mill and mastering the technology of rail production on modern equipment in the rail-rolling workshop of JSC EVRAZ ZSMK. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014, no. 6 (1374), pp. 32–38.
17. Yur'ev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A. *Structure and Properties of Long-Length Differentially Hardened Rails after Extremely Long Operation*. Yekaterinburg: Poligrafist, 2020, 253 p. (In Russ.).
18. Friebe G., Guriev S., Pittman R., Shevyakhova E., Tomová A. Rail-road restructuring in Russia and central and eastern Europe: one solution for all problems? *Transport Reviews*. 2007, vol. 27, no. 3, pp. 251–271. <https://doi.org/10.1080/01441640600979502>
19. ТУ 0921-323-01124323-2012. Railway rails of the R65 type of the DT370IK category manufactured by JSC EVRAZ ZSMK, welded by electric contact method. (In Russ.).
20. Abdurashitov A.Yu., Kuznetsov S.V. Influence of irregularities on rails rolling surface on interaction of the track and rolling stock. *Vnedrenie sovremennykh konstruktssii i peredovykh tekhnologii v putevoe khozaystvo*. 2018, vol. 13, no. 13 (13), pp. 103–114. (In Russ.).
21. Alekhin A.L., Blazhko L.S., Nikerov N.S. Forecasting of a single output of rails welded by the aluminothermite method. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*. 2011, no. 4 (29), pp. 23–29. (In Russ.).
22. Andersson R., Torstensson P.T., Kabo E., Larsson F. The influence of rail surface irregularities on contact forces and local stresses. *Vehicle System Dynamics. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2015, vol. 53, no. 1, pp. 68–87. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.982890>
23. Krysanov L.G. On establishment of geometric standards of short vertical irregularities on rails for a speed of 250 km/h. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2009, no. 1, pp. 15–21. (In Russ.).
24. Guo Y.J., Xie Z.J., Wang Y.Z., Tao G.M. Multiplex analytical method for metal three-dimensional flow of heavy rail rolling by universal mill. *Chongqing Daxue Xuebao*. 2010, vol. 33, no. 1, pp. 31–35.
25. Pei N.N., Zhu G.M., Li B., Tao G.M., Kang Y.L. 3D thermo-mechanical coupled simulation of whole rolling process for 60 kg/m heavy rail. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014, vol. 21, no. 12, pp. 1104–1110. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60190-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60190-4)
26. Dong Y.G., Zhang W.Z., Song J.F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 1, pp. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
27. Skosar' E.O., Shilov V.A., Shvarts D.L. Investigation of temperature conditions of long rails rolling on a universal rail-structural steel mill. *Proizvodstvo prokata*. 2012, no. 11, pp. 7–11. (In Russ.).
28. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. *Grade Guide on Steels and Alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).
29. GOST R 51685–2013. Railway rails. General technical conditions. (In Russ.).
30. Belolipetskaya E.S., Solov'ev V.N. Technological reason for difference in sizes of ends of 100-meter long rails. In: *Proceedings of the Regional Profile Seminar "School of Young Scientists" on the Problems of Technical Sciences, October 16, 2020*. Lipetsk: LSTU, 2020, pp. 23–26. (In Russ.).
31. Benyakovskii M.A., Bogoyavlenskii K.N., Vitkin A.I., Garber E.A., Golovanenko S.A., Gritsuk N.F., Zhadan V.T., Zheleznov Yu.D., Zyzun V.I., Litovchenko N.V., Molchanov A.I., Petichev A.N., Lopukhin P.I., Saf'yan M.M., Tret'yakov A.B. *Technology of Rolling Production: Vol. 2*. Moscow: Metallurgiya, 1991, 423 p. (In Russ.).
32. Rudskoi A.I., Lunev V.A. *Theory and Technology of Rolling Production*. St. Petersburg: Lan', 2020, 528 p. (In Russ.).
33. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips. *Frattura ed*

- Integrita Strutturale. 2016. Vol. 10. No. 37. P. 312–317.
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.41>
34. Wang M.T., Zang X.L., Li X.T., Du F.S. Finite element simulation of hot strip continuous rolling process coupling microstructural evolution // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2007. Vol. 14. No. 3. P. 30–36. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60039-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60039-9)
35. Zhou S.X. An integrated model for hot rolling of steel strips // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 134. No. 3. P. 338–351. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01118-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01118-4)
36. Hwang S.M., Sun C.G., Ryoo S.R., Kwak W.J. An integrated FE process model for precision analysis of thermo-mechanical behaviors of rolls and strip in hot strip rolling // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002. Vol. 191. No. 37. P. 4015–4030. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00298-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00298-0)
37. Mei R.B., Li C.S., Liu X.H., Han B. Analysis of strip temperature in hot rolling process by finite element method // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 2. P. 17–21. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60052-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60052-0)
38. Мухин Ю.А., Соловьев В.Н., Шунин А.В., Макаров Е.В. Стабилизация структуры и механических свойств по длине полосы при горячей прокатке слэбов большой массы. В кн.: Проблемы фундаментальной механики в теории обработки металлов давлением. Труды расширенного научного семинара. М.: МАМИ, 2008. С. 117–126.
- Integrita Strutturale. 2016. vol. 10, no. 37, pp. 312–317.
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.41>
34. Wang M.T., Zang X.L., Li X.T., Du F.S. Finite element simulation of hot strip continuous rolling process coupling microstructural evolution. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2007, vol. 14, no. 3, pp. 30–36. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60039-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60039-9)
35. Zhou S.X. An integrated model for hot rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, vol. 134, no. 3, pp. 338–351. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01118-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01118-4)
36. Hwang S.M., Sun C.G., Ryoo S.R., Kwak W.J. An integrated FE process model for precision analysis of thermo-mechanical behaviors of rolls and strip in hot strip rolling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002, vol. 191, no. 37, pp. 4015–4030. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00298-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00298-0)
37. Mei R.B., Li C.S., Liu X.H., Han B. Analysis of strip temperature in hot rolling process by finite element method. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 2, pp. 17–21. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60052-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60052-0)
38. Mukhin Yu.A., Solov'ev V.N., Shunin A.V., Makarov E.V. Stabilization of structure and mechanical properties along the strip length during hot rolling of slabs of large mass. In: *Problems of Fundamental Mechanics in the Theory of Metalworking by Pressure: Proceedings of an Extended Sci. Seminar*. Moscow: MAMI, 2008, pp. 117–126. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Николаевич Соловьев, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением, Липецкий государственный технический университет
ORCID: 0000-0003-1453-2422
E-mail: solovyovvn@mail.ru

Елизавета Сергеевна Белолипецкая, студент кафедры обработки металлов давлением, Липецкий государственный технический университет
E-mail: belolipetskaya_es@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir N. Solov'ev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metal Forming, Lipetsk State Technical University
ORCID: 0000-0003-1453-2422
E-mail: solovyovvn@mail.ru

Elizaveta S. Belolipetskaya, Student of the Chair of Metal Forming, Lipetsk State Technical University
E-mail: belolipetskaya_es@mail.ru

Поступила в редакцию 23.12.2021
После доработки 18.01.2022
Принята к публикации 19.01.2022

Received 23.12.2021
Revised 18.01.2022
Accepted 19.01.2022