

УДК 621.771.011

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ЛЕГИРОВАННЫХ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ ПРОКАТКИ*

Уманский А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия черных металлов» (umanski@bk.ru)
Головатенко А.В.², к.т.н., директор по рельсовому производству (Aleksy.Golovatenko@evraz.com)

Симачев А.С.¹, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (simachev_as@mail.ru)

Дорофеев В.В.², д.т.н., главный калибровщик (Vladimir.Dorofeev@evraz.com)

Осколкова Т.Н.¹, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (oskolкова@kuz.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

Аннотация. На основании проведенных экспериментальных исследований определены и научно обоснованы закономерности влияния температурно-скоростных условий прокатки на пластичность и сопротивление деформации по зонам непрерывнолитых заготовок легированных рельсовых сталей марок Э76ХФ, Э76ХСФ. Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере зависимостей пластичности рельсовой стали Э76ХФ от температуры деформации. В частности, для приповерхностных слоев непрерывнолитых заготовок зафиксировано заметное снижение пластичности в температурном интервале 1025 – 1075 °С, которое отсутствует для слоев, расположенных в центральной зоне заготовок. Обобщение результатов исследований пластичности различных слоев непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э76ХФ показало, что абсолютные значения пластичности значительно снижаются по мере удаления от поверхности к центральной зоне. Этот факт объясняется более крупнозернистой структурой и повышенной концентрацией неметаллических включений в центральной зоне непрерывнолитых заготовок относительно приповерхностных слоев заготовок, что подтверждено результатами металлографических исследований. В частности, установлено, что средний диаметр зерен в поверхностном слое деформированных непрерывнолитых заготовок в 1,3 – 2,1 раза меньше по сравнению с центральной зоной заготовок. Подтверждено наличие в центральной зоне непрерывнолитых заготовок значительной концентрации недеформирующихся включений силикатного типа ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$; $FeO \cdot SiO_2$; $MnO \cdot SiO_2$), оказывающих наиболее отрицательное влияние на пластичность стали. При этом в приповерхностной зоне непрерывнолитых заготовок такие включения отсутствуют. На основании проведенных исследований установлено, что с увеличением температуры деформации рельсовой стали Э76ХСФ происходит уменьшение сопротивления пластической деформации по экспоненциальному закону. При этом абсолютные значения сопротивления деформации рассматриваемой стали снижаются по мере удаления от поверхности к центральной зоне непрерывнолитых заготовок, что связано с проиллюстрированным выше увеличением размера зерна и локализацией неметаллических включений. Выявленная тенденция по снижению сопротивления деформации от поверхностных слоев к центру непрерывнолитых заготовок сохраняется независимо от скорости деформации, при этом абсолютные значения сопротивления деформации значительно возрастают с ростом скорости деформирования от 1 до 10 с⁻¹. Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила получить уравнения регрессии, позволяющие с достаточной степенью достоверности прогнозировать пластические и деформационные свойства легированных рельсовых сталей марок Э76ХФ и Э76ХСФ при заданных условиях прокатки и являющиеся комплексной теоретической базой для разработки и совершенствования новых режимов нагрева заготовок под прокатку и схем прокатки рельсов. Адекватность полученных экспериментальных зависимостей подтверждена результатами опытно-промышленного опробования нового режима производства железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Ключевые слова: пластичность, рельсовая сталь, легирование, сопротивление деформации, регрессионный анализ, микроструктура, неметаллические включения, режим прокатки, железнодорожные рельсы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-452-460

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций развития мировой и отечественной металлургии является повышение доли

* Работа выполнена в СибГИУ с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Металловедение» в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.6365.2017/8.9.

готовой продукции из сложнолегированных сталей в общей структуре производства. Имеет место как расширение области применения существующих сложнолегированных сталей, так и разработка их новых марок. Повышение степени и сложности легирования позволяет получать изделия из сталей, обладающих целым комплексом специальных свойств, что значительно продлевает срок их эксплуатации, приводит к повышению

эффективности их применения. Указанная тенденция характерна и применительно к производству железнодорожных рельсов на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», являющемся ведущим поставщиком рельсовой продукции в России. В настоящее время в качестве основных сталей для производства железнодорожных рельсов используются сложнолегированные стали марок Э76ХФ и Э76ХСФ взамен ранее используемой стали марки Э76Ф.

Имеющиеся данные многочисленных фундаментальных и прикладных научных исследований позволяют говорить о снижении пластических [1 – 7] и деформационных [8 – 15] характеристик сталей с повышением степени и сложности их легирования, что закономерно приводит к ухудшению качества готового проката и увеличению удельных энергозатрат на его производство. При этом теоретическое обоснование оптимальных температурных интервалов деформации, при которых пластичность имеет максимальные, а сопротивление деформации минимальные значения, значительно затруднено в связи со сложностью и многовариантностью структурных изменений в сталях при вводе легирующих добавок в различном сочетании их видов и концентраций. Применительно к производству рельсовых профилей, имеющих сложную форму поперечного сечения, указанная проблема усугубляется значительной неравномерностью деформаций в процессе прокатки.

Таким образом, в настоящее время особенную значимость и актуальность, с точки зрения обеспечения высокого уровня качества железнодорожных рельсов и энергоэффективности их производства, приобретают исследования зависимостей пластичности и сопротивления пластической деформации легированных рельсовых сталей от температурных условий прокатки.

В соответствии с вышесказанным основной целью настоящей работы является теоретическое обоснование для разработки и совершенствования режимов деформации легированных рельсовых сталей вновь осваиваемых марок, обеспечивающих повышение качества готовых рельсов и увеличение энергоэффективности их производства.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленную работу проводили в три этапа. На первом этапе проведены экспериментальные исследования пластичности рельсовой стали марки Э76ХФ, целью которых было определение закономерностей изменения ее деформируемости при различных температурных условиях прокатки. На втором этапе осуществляли исследования сопротивления пластической деформации рельсовой стали марки Э76ХСФ с целью разработки обоснованных рекомендаций по повышению энергоэффективности режимов прокатки, а именно по распределению обжатий между проходами в процессе прокатки рельсов, обеспечивающим оптимальную

загрузку приводов клетей. На третьем этапе проводили опытно-промышленное опробование новых, разработанных с учетом полученных данных о пластических и деформационных характеристиках рельсовых сталей легированных марок, режимов прокатки железнодорожных рельсов в условиях промышленного универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В качестве объекта исследований по определению пластичности и сопротивления деформации использовали непрерывнолитые заготовки сечением 300×360 мм плавок текущего производства электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Отбор проб проводили по следующей схеме: с поверхности заготовок, на глубине 50, 75 и 110 мм от поверхности заготовок. Схема вырезки образцов выбрана исходя из возможности получения информации о пластических и деформационных характеристиках стали в различных зонах непрерывнолитой заготовки. Известно, что в зависимости от особенностей строения (величины и расположения зерен) можно выделить три основные зоны непрерывнолитой заготовки: корковую, столбчатых кристаллов и центральную. Кроме того, согласно данным различных исследователей [16, 17] при высоком очаге деформации (отношение длины дуги захвата к средней высоте полосы менее 1,5), характерном для прокатки в первых проходах на рельсобалочных станах, имеет место значительная неравномерность деформации по сечению заготовки: более интенсивно деформируются поверхностные слои заготовки по сравнению с центральной зоной. Приведенные данные о наличии физической и химической неоднородностей стали и существенных различий условий деформации обуславливают необходимость исследования пластических и деформационных характеристик различных зон по сечению непрерывнолитых заготовок.

Следует отметить, что указанные марки стали имеют практически аналогичный химический состав согласно требований ГОСТ Р 51685 – 2013. Различия имеются только в интервалах изменения допустимого содержания кремния и хрома, при этом указанные диапазоны перекрываются. Анализ химического состава образцов плавок сталей Э76ХФ и Э76ХСФ текущего производства, отобранных для проведения исследований (25 плавок), показал, что их химический состав практически аналогичен (см. таблицу), т.е. результаты исследований, полученные для одной из рассматриваемых марок стали, правомочно распространить на другую марку стали.

В связи с этим исследования пластичности проводили для образцов стали Э76ХФ, а исследования сопротивления деформации – для Э76ХСФ.

Исследования пластичности проводили методом горячего кручения с использованием специализированной установки, включающей в себя следующие основные элементы: вращающийся и неподвижный валы с пазами для установки образцов, привод подвижного

Фактический химический состав плавок рельсовых сталей текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Actual chemical composition of current rail steel melts at JSC “EVRAZ ZSMK”

Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)						
	C	Mn	Si	Cr	V	P	S
Э76ХФ	0,76 – 0,78	0,82 – 0,90	0,48 – 0,52	0,36 – 0,44	0,03 – 0,04	0,011 – 0,016	0,009 – 0,013
Э76ХСФ	0,75 – 0,79	0,78 – 0,87	0,32 – 0,55	0,52 – 0,57	0,05 – 0,06	0,005 – 0,015	0,012 – 0,017

вала в виде электродвигателя с тиристорным приводом, печь сопротивления, фиксатор количества оборотов, термopара. Исследования проводили в температурном интервале 900 – 1200 °С с шагом 50 °С, при этом в интервале температур 1000 – 1100 °С величину шага снизили до 25 °С, что связано с имеющимися данными о резком снижении пластичности при температуре порядка 1050 °С для легированных сталей схожего химического состава [18, 19]. Скорость деформации при проведении экспериментальных исследований составляла 1 с⁻¹ и не варьировалась в связи с техническими ограничениями по возможностям используемой экспериментальной установки.

При обработке результатов в качестве критерия пластичности приняли степень деформации сдвига, определяемую по следующей формуле:

$$\lambda_p = \frac{\pi d_0 z}{l_0},$$

где l_0 и d_0 – длина и диаметр исходных цилиндрических образцов соответственно, мм; z – число оборотов до разрушения.

Исследования сопротивления деформации проводили методом горячей осадки с использованием модуля «Hydrawedge» установки «Gleeble System 3800». Исследования сопротивления деформации проводили в температурном интервале 900 – 1150 °С с шагом 50 °С при скорости деформации 1 и 10 с⁻¹. Указанный интервал скоростей деформации соответствует фактическим значениям при прокатке на рельсобалочных станах.

С целью определения физической природы полученных закономерностей изменения пластических и деформационных характеристик непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей в интервале температур прокатки проводили металлографические исследования с использованием оптического микроскопа «OLYMPUS GX-51» и сканирующего электронного микроскопа «TESCAN MIRA 3 LMN» с автоэмиссионным катодом Шоттки, определение фазового состава проводили с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-6000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере зависимостей пластичности рельсовой стали

Э76ХФ от температуры деформации для приповерхностного и расположенного на глубине 50 мм слоев непрерывнолитой заготовки (рис. 1, а, б). В обоих случаях при повышении температуры деформации от 900 до 1000 °С пластичность интенсивно возрастает, затем при дальнейшем увеличении температуры происходит заметное снижение пластичности с минимальным значением при температурах порядка 1025 – 1050 °С, после чего пластичность резко увеличивается, достигая максимальных значений при 1100 °С, а в интервале температур 1100 – 1200 °С происходит плавное снижение пластичности.

Следует отметить, что в ходе ранее проведенных исследований пластичности рельсовой стали марки Э76Ф [20] не было зафиксировано «провала» пластичности поверхностных и приповерхностных слоев непрерывнолитых заготовок при температурах порядка 1050 °С.

Обобщение результатов исследований пластичности различных слоев непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э76ХФ показало, что абсолютные значения пластичности значительно снижаются по мере удаления от поверхности к центральной зоне (рис. 1, а – з), что в основном обусловлено различием в величине зерна. Как указано выше, непрерывнолитые заготовки имеют трехзонную структуру. В приповерхностных слоях непрерывнолитых заготовок находится так называемая корковая зона, имеющая глубину порядка 15 – 25 мм и обладающая наиболее мелкозернистой структурой. За корковой зоной расположена зона столбчатых кристаллов, состоящая из крупных, вытянутых в перпендикулярных граням направлениях кристаллов (толщина зоны составляет порядка 50 – 60 мм). Весь остальной объем занимает центральная (осевая) зона, состоящая из крупных различно ориентированных кристаллов.

Проведенными металлографическими исследованиями образцов после испытаний на горячее кручение подтверждено значимое увеличение среднего размера зерна от поверхности к осевой зоне: средний диаметр зерен в поверхностном слое деформированных непрерывнолитых заготовок в 1,3 – 2,1 раза меньше по сравнению с центральной зоной заготовок, при этом различие в размерах зерен повышается с увеличением температуры деформации (рис. 2).

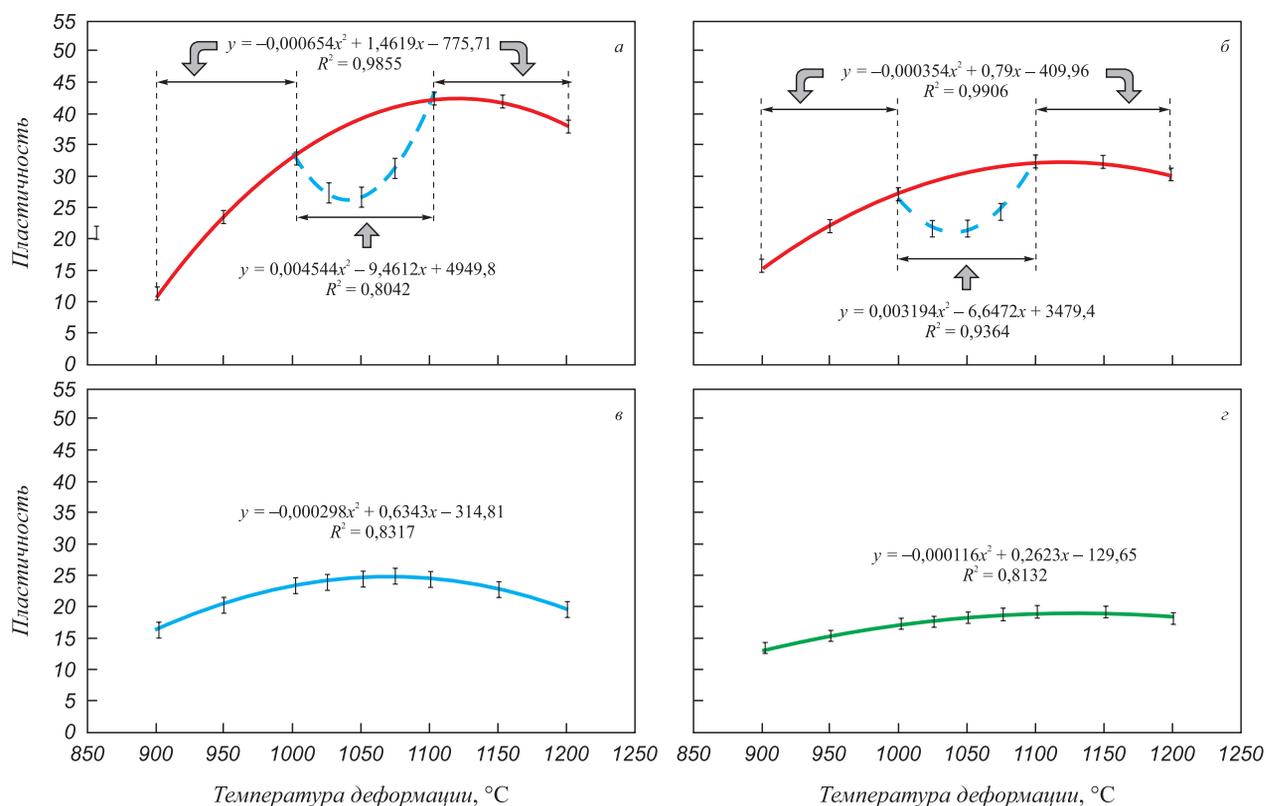


Рис. 1. Зависимость пластичности непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э76ХФ от температуры T_d деформации: а – поверхностный слой; б, в и г – на глубине 50, 75 и 110 мм от поверхности соответственно; --- – «провал» пластичности

Fig. 1. Dependence of plasticity of continuously cast billets of rail E76KhF steel on deformation temperature T_d : а – surface layer; б, в and г – at a depth of 50, 75 and 110 mm from the surface, respectively; --- – “failure” of plasticity

Дополнительным фактором, обуславливающим различие пластических характеристик по зонам непрерывнолитых заготовок, является состав и концентрация неметаллических включений. Известно [21, 22], что наличие неметаллических включений приводит к лока-

лизации деформации за счет взаимодействия с движущимися дислокациями, что приводит к торможению миграции границ зерен. На основании проведенных металлографических исследований образцов стали Э76ХФ показано, что наибольшая концентрация неметаллических включений имеет место в центральной зоне непрерывнолитых заготовок. При этом в указанной зоне содержатся недеформирующиеся включения силикатного типа ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$; $FeO \cdot SiO_2$; $MnO \cdot SiO_2$), оказывающие наиболее отрицательное влияние на пластичность стали (рис. 3).

Математическая обработка результатов исследований позволила получить уравнения регрессии, адекватно отображающие зависимости пластичности от температуры деформации для всех рассматриваемых слоев непрерывнолитых заготовок (рис. 1). По полученным данным зависимости пластичности поверхностного и приповерхностного слоев непрерывнолитых заготовок от температуры деформации достаточно точно описываются полиномами второй степени с выраженным максимумом за исключением температурного интервала между 1000 и 1100 °С, где зависимости пластичности от температуры деформации описываются полиномами второй степени с выраженным минимумом (рис. 1, а, б). Зависимости пластичности слоев непрерывнолитых заготовок, расположенных ближе

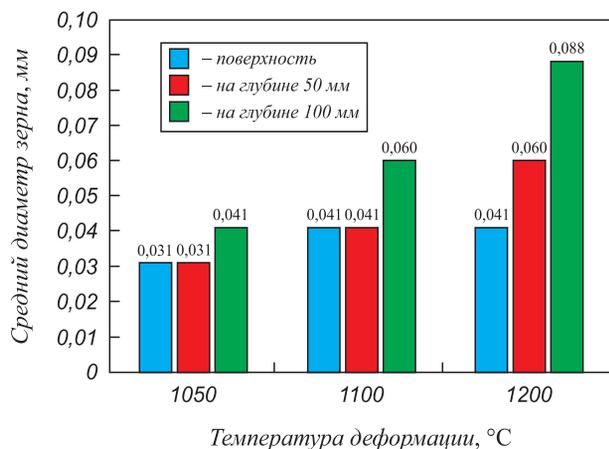


Рис. 2. Распределение среднего размера зерна по сечению непрерывнолитых заготовок стали Э76ХФ: 1 – на поверхности; 2 – на глубине 50 мм; 3 – на глубине 110 мм

Fig. 2. Distribution of the average grain size over the cross section of continuously cast billets of E76KhF steel 1 – on the surface; 2 – at a depth of 50 mm; 3 – at a depth of 110 mm

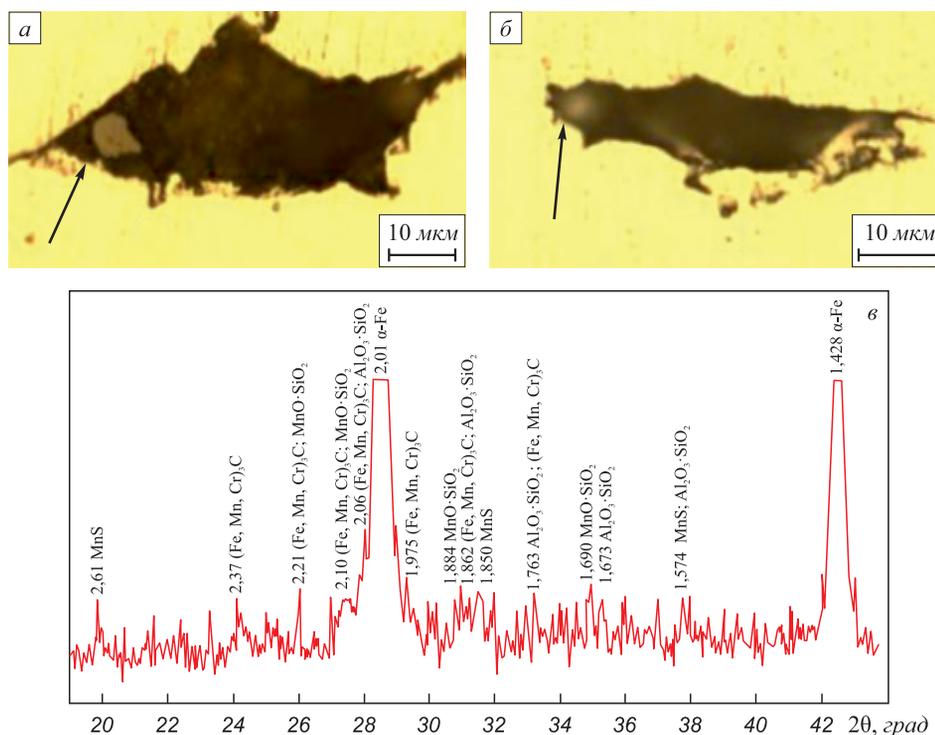


Рис. 3. Результаты анализа микроструктуры центральной зоны непрерывнолитой заготовки стали Э76ХФ: а – алумосиликаты ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$); б – шпинели ($\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$); в – дифрактограмма

Fig. 3. Results of microstructure analysis of central zone of E76KhF steel billet: а – aluminosilicates ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$); б – spinel ($\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$); в – diffractogram

к центральной зоне, от температуры деформации с высокой степенью достоверности описываются полиномами второй степени с выраженными максимумами на всем рассматриваемом температурном интервале (900 – 1200 °С) (рис. 1, в, г).

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что с увеличением температуры деформации рельсовой стали Э76ХСФ происходит уменьшение сопротивления пластической де-

формации по экспоненциальному закону (рис. 4). При этом абсолютные значения сопротивления деформации рассматриваемой стали снижаются по мере удаления от поверхности к центральной зоне непрерывнолитых заготовок, что связано с проиллюстрированным выше увеличением размера зерна и локализацией неметаллических включений. Увеличение размеров зерен приводит к снижению суммарной площади межзеренных границ и, тем самым, к уменьшению препятствий для

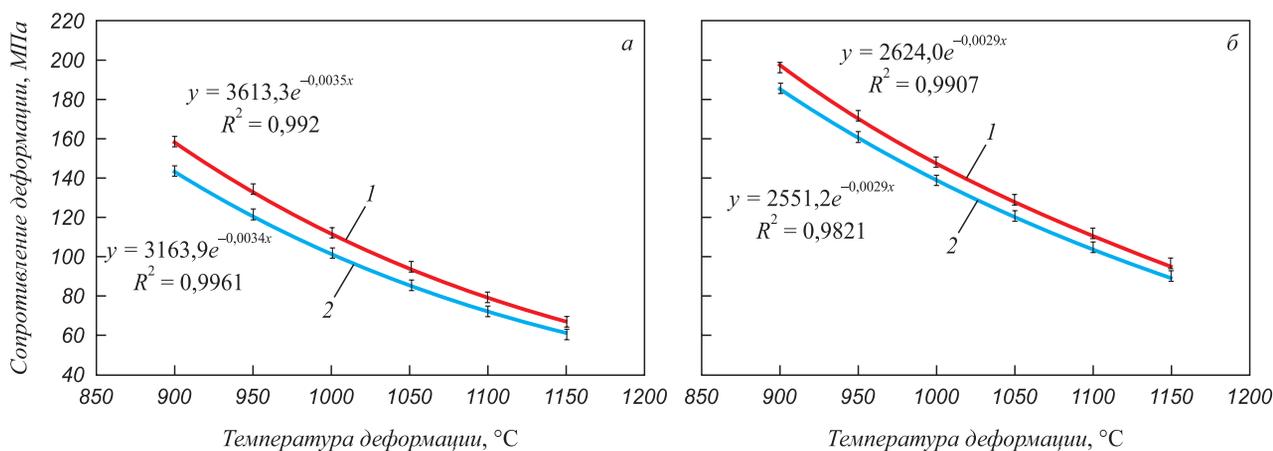


Рис. 4. Зависимость сопротивления пластической деформации стали Э76ХСФ от температуры при скоростях деформации 1 (а) и 10 (б) с⁻¹: 1 – поверхностный слой непрерывнолитой заготовки; 2 – на глубине 50 мм от поверхности непрерывнолитой заготовки

Fig. 4. Dependence of plastic deformation resistance of E76KhSF steel on temperature at strain rates 1 (a) and 10 (б) s⁻¹: 1 – surface layer of continuously cast billet; 2 – depth 50 mm from the surface of continuously cast billet

вытягивания зерен в процессе деформации, облегчает выход дислокаций на межзеренные границы. В свою очередь неметаллические включения являются эффективными блокираторами внутриверного скольжения при всех температурах и скоростях деформации [22].

Выявленная тенденция по снижению сопротивления деформации от поверхностных слоев к центру непрерывнолитых заготовок сохраняется независимо от скорости деформации, при этом абсолютные значения сопротивления деформации значительно возрастают с ростом скорости деформирования от 1 до 10 с^{-1} (рис. 4, а, б). Следует отметить, что значительное влияние скорости деформирования на сопротивление пластической деформации было зафиксировано и по результатам ранее проведенных исследований [23 – 25] применительно к рельсовой стали схожего химического состава.

Влияние скорости деформации на сопротивление пластическому деформированию связано с тем, что повышение скорости деформации способствует ускорению процессов упрочнения, реализующихся за счет повышения плотности дислокаций и точечных дефектов, увеличения сил внутреннего трения [26, 27], а скорость процессов разупрочнения при этом остается неизменной.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные зависимости пластичности и сопротивления деформации рельсовых сталей от температурно-скоростных условий деформации являются комплексной теоретической базой для проектирования и совершенствования режимов нагрева заготовок под прокатку и схем прокатки рельсов. Исходя из полученных данных, целесообразно выбирать температуру нагрева заготовок и перераспределять обжатию между проходами таким образом, чтобы при температурах 1100 – 1150 °С максимальной пластичности обжатию имели наибольшие значения, а на температурный интервал 1025 – 1075 °С «провала» пластичности приходились наименьшие деформации. Кроме того, с учетом сложной формы калибров, формирующих рельсовый профиль, необходимо учитывать полученные данные о неравномерности пластических свойств приповерхностного и расположенных ближе к осевой зоне слоев непрерывнолитых заготовок. Учет неравномерности пластичности по сечению исходных заготовок особенно важен применительно к разрезным калибрам, в которых происходит формирование отдельных элементов рельсового профиля (головки, шейки, подошвы) и обжатию по ширине калибров имеют наибольшую неравномерность. Фактором, ограничивающим увеличение обжатию, являются допустимые нагрузки на основное и вспомогательное оборудования стана, в том числе на

привод клетей. Величина указанных нагрузок определяется усилием прокатки, которое, в свою очередь, прямо пропорционально зависит от сопротивления пластической деформации. Полученные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали от температуры и скорости деформации позволяют с достаточной степенью достоверности прогнозировать изменение нагрузок на оборудование стана при изменении режимов проходов, что позволяет избежать повышенного износа оборудования и снизить риск аварийных ситуаций.

С целью практического подтверждения адекватности полученных экспериментальных зависимостей проведено опытно-промышленное опробование в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ВРЗЗСМК» нового режима производства длинномерных железнодорожных рельсов Р65 из стали Э76ХФ. Отличительными особенностями нового режима является снижение температуры нагрева заготовок с 1200 до 1170 – 1180 °С и сокращение количества проходов в обжимных клетях, в результате чего прокатку в разрезном калибре осуществляли при температуре (порядка 1100 °С) максимальной пластичности. Проведенные с использованием метода осциллографирования исследования показали, что при использовании разработанного интенсифицированного режима прокатки моменты на валу двигателей обжимных клетей не превышают допустимых значений, что говорит о достоверности прогнозных значений сопротивления деформации. В результате использования нового режима прокатки зафиксировано снижение отбраковки рельсов по дефектам поверхности, что явилось подтверждением более благоприятных температурных условий деформации по проходам. Кроме того, по результатам опробования усовершенствованного режима производства рельсов получены данные о снижении удельного расхода топлива на нагрев заготовок и удельного расхода энергии на прокат, повышения производительности прокатного стана. Совокупный экономический эффект от внедрения новых режимов нагрева заготовок и прокатки рельсов оценивается на уровне 120 млн. руб/год.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований определены и научно обоснованы закономерности влияния температурно-скоростных условий прокатки на пластичность и сопротивление деформации по зонам непрерывнолитых заготовок легированных рельсовых сталей марок Э76ХФ, Э76ХСФ.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила получить уравнения регрессии, позволяющие с достаточной степенью достоверности прогнозировать пластические и деформационные свойства указанных рельсовых сталей при заданных условиях прокатки. Они являются комплексной теоретической базой для разработки и совершенство-

вания новых режимов нагрева заготовок под прокатку и схем прокатки рельсов. Адекватность полученных экспериментальных зависимостей подтверждена результатами опытно-промышленного опробования нового режима производства железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dimatteo A., Lovicu G., DeSanctis M., Valentini R. Effect of temperature and microstructure on hot ductility properties of a boron steel // *Proceedings of Crack Paths*. 2012. P. 131 – 138.
2. Дженсто С.Г. Влияние характеристик выплавки и разлива на горячую пластичность балочной, сортовой и слябовой заготовки из ниобийсодержащих сталей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 9. С. 13 – 20.
3. Lopez-Chipres E., Mejia I., Maldonado C., Bedolla-Jacuinde A., Cabrera J.M. Hot ductility behavior of boron microalloyed steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2007. Vol. 460-461. P. 464 – 470.
4. Banks K.M., Tuling A., Klinkenberg C., Mintz B. The influence of Ti on the hot ductility of Nb containing steels // *Materials Science and Technology*. 2011. Vol. 27. No. 2. P. 537 – 545.
5. Mintz B. The influence of composition on the hot ductility of steel and to the problem of transverse cracking // *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. No. 9. P. 833 – 855.
6. Yang B., Degischer H.P., Presslinger H., Xia G., Reisinger P. Influence of chemical composition on high temperature tensile properties of carbon steels // *BHM Berg- und Huttenmannische Monatshefte*. 2005. Vol. 150. No. 9. P. 313 – 320.
7. Crowther D.N. The effects of microalloying elements on cracking during continuous casting. – In book: *Proceeding of the Int. Symposium on Vanadium Application Technology*. Beijing (China), Vanitec, Westerham, Kent (England). 2001. P. 99 – 131.
8. Гладковский С.В., Потопов А.И., Лепихин С.В. Исследование сопротивления деформации мартенситно-старееющей стали ЭП679 // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2015. No. 4. P. 18 – 28.
9. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karaymyshv A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the resistance of steels 18KhMFb and 18Kh3MFb to hot deformation // *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. No. 11. P. 1118 – 1121.
10. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08Kh18N10T steel at a hot-deformation temperature // *Russian metallurgy (Metally)*. 2008. Vol. 2008. No. 2. P. 138 – 141.
11. Hildenbrand A., Molinari A., Baczynski J. Self-consistent poly crystal modelling of dynamic recrystallization during the shear deformation of a Ti IF steel // *Acta Mater*. 1999. Vol. 47. No. 2. P. 447 – 460.
12. Marx E. Simulation of primary recrystallization // *Acta Mater*. 1999. Vol. 47. No. 4. P. 1219 – 1230.
13. Manonukul A., Dunne N. Dynamic recrystallization // *Acta Mater*. 1999. Vol. 47. No. 7. P. 4339 – 4354.
14. Ding R., Guo Z.X. Microstructural modeling of dynamic recrystallization using an extended cellular automaton approach // *Computational Materials Science*. 2002. No. 23. P. 209 – 218.
15. Goetz R.L., Seetharaman V. Modeling dynamic recrystallization using cellular automata // *Scripta Materialia*. 1998. Vol. 38. No. 3. P. 405 – 413.
16. Гетманец В.В., Шевчук В.Я. Рациональные режимы работы блюминга. – М.: Металлургия, 1990. – 136 с.
17. Теория прокатки крупных слитков / А.П. Чекмарёв, В.Л. Павлов, В.И. Мелешко, В.А. Токарев. – М.: Металлургия, 1968. – 252 с.
18. Дзугото М.Я. Пластичность и деформируемость высоколегированных сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1990. – 303 с.
19. Бирза В.В., Бирза А.В. Классификация сталей по показателю предельной пластичности при обработке давлением // *Сталь*. 2010. № 7. С. 66 – 71.
20. Симачев А.С., Осолкова Т.Н., Темлянцев М.В. Влияние неметаллических включений рельсовой стали на высокотемпературную пластичность // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 2. С. 134 – 137.
21. Голубцов В.А., Шубя Л.Г., Усманов Р.Г. Внепечная обработка и модифицирование стали // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2006. № 11. С. 47 – 51.
22. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. – Днепропетровск: АРТ ПРЕСС, 2005. – 536 с.
23. Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадыков В.Н. Разработка теоретических основ определения энергосиловых параметров прокатки при освоении новых марок рельсовых сталей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 804 – 810.
24. Umansky A.A., Dumova L.V., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/150/1/012029/pdf> (дата обращения: 20.12.2018).
25. Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадыков В.Н. Совершенствование режимов прокатки железнодорожных рельсов в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана // *Черные металлы*. 2016. № 11. С. 16 – 21.
26. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение. – М.: Альянс, 2012. – 643 с.
27. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Металловедение. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.

Поступила в редакцию 11 ноября 2018 г.
После доработки 18 марта 2019 г.
Принята к публикации 20 марта 2019 г.

PLASTICITY AND DEFORMATION RESISTANCE OF THE ALLOYED RAIL STEELS IN ROLLING TEMPERATURE INTERVAL

A.A. Umanskii¹, A.V. Golovatenko², A.S. Simachev¹,
V.V. Dorofeev², T.N. Oskolkova¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. On the basis of conducted experimental studies, regularities of the influence of temperature-speed rolling conditions on the plasticity and deformation resistance in the zones of continuously cast billets of alloy rail steels of E76KhF, E76KhSF grades are determined and scientifically substantiated. The results indicate the complex nature of dependence of rail steel E76KhF plasticity on deformation temperature. In particular, for near-surface layers of continuously cast billets, a noticeable decrease in plasticity in the temperature range of 1025 – 1075 °C was recorded, which is absent for the layers located in central zone of that billets. Generalization of the results of plasticity studies of various layers of continuously cast rail E76KhF steel billets has shown that absolute values of the plasticity criterion are significantly reduced with the distance from the surface to the central zone. This fact can be explained by a coarse-grained structure and increased concentration of non-metallic inclusions in the central zone of continuously cast billets relative to their surface layers; it was confirmed by the results of metallographic studies. In particular, it was found that the average grains diameter in the surface layer of deformed continuously cast billets is in 1.3 – 2.1 times less compared to the central zone. There was confirmed the presence of significant concentrations of non-deformable inclusions of the silicate type ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$; $FeO \cdot SiO_2$; $MnO \cdot SiO_2$), which have most negative influence on steel plasticity while in the surface area such inclusions are absent. On the basis of conducted researches it was established that with increase in deformation temperature of rail steel E76KhSF there is a decrease in resistance to plastic deformation according to the exponential law. In this case, absolute values of the steel deformation resistance are reduced with the distance from the surface to the central zone of continuously cast billets, which is associated with the above illustrated increase in grain size and localization of non-metallic inclusions. The revealed tendency to reduce the deformation resistance from the surface layers to the center of continuously cast billets is maintained regardless to deformation rate, while the absolute values of the deformation resistance increase significantly with the growth of deformation rate from 1 to 10 s⁻¹. Mathematical processing of the obtained experimental data allowed to obtain regression equations that help to predict plastic and deformation properties of alloyed rail steels of E76KhF and E76KhSF grades with a sufficient degree of reliability under the specified rolling conditions and are complex theoretical basis for the development and improvement of new heating modes of billets for rolling and rail rolling schemes. Adequacy of the obtained experimental dependences is confirmed by results of pilot industrial testing of the new mode of railway rails production on the universal rail mill of “EVRAZ ZSMK”.

Keywords: ductility, rail steel, alloying, deformation resistance, regression analysis, microstructure, nonmetallic inclusions, rolling mode, railway rails.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-452-460

REFERENCES

- Dimatteo A., Lovicu G., DeSanctis M., Valentini R. Effect of temperature and microstructure on hot ductility properties of a boron steel. *Proceedings of Crack Paths*. 2012, pp. 131–138.
- Jansto S.G. Effect of melting and casting parameters on the hot ductility behavior of Nb-bearing beams, billets and slabs. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, vol. 54, no. 9, pp. 13–20. (In Russ.).
- Lopez-Chipres E., Mejia I., Maldonado C., Bedolla-Jacuinde A., Cabrera J.M. Hot ductility behavior of boron microalloyed steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2007, vol. 460-461, pp. 464–470.
- Banks K.M., Tuling A., Klinkenberg C., Mintz B. The influence of Ti on the hot ductility of Nb containing steels. *Materials Science and technology*. 2011, vol. 27, no. 2, pp. 537–545.
- Mintz B. The influence of composition on the hot ductility of steel and to the problem of transverse cracking. *ISIJ International*. 1999, vol. 39, no. 9, pp. 833–855.
- Yang B., Degischer H.P., Presslinger H., Xia G., Reisinger P. Influence of chemical composition on high temperature tensile properties of carbon steels. *BHM Berg- und Huttenmannische Monatshefte*. 2005, vol. 150, no. 9, pp. 313–320.
- Crowther D.N. The effects of microalloying elements on cracking during continuous casting. In: *Proceeding of the Int. Symposium on Vanadium Application Technology*. Beijing (China), Vanitec, Westerham, Kent (England), 2001, pp. 99–131.
- Gladkovskii S.V., Potapov A.I., Lepikhin S.V. Study of resistance to deformation of EP679 martensitic-aging steel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2015, no. 4, pp. 18–28. (In Russ.).
- Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the resistance of steels 18KhMFB and 18Kh3MFB to hot deformation. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 11, pp. 1118–1121.
- Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08Kh18N10T steel at a hot-deformation temperature. *Russian metallurgy (Metally)*. 2008, vol. 2008, no. 2, pp. 138–141.
- Hildenbrand A., Molinari A., Baczynski J. Self-consistent poly crystal modelling of dynamic recrystallization during the shear deformation of a Ti IF steel. *Acta Mater*. 1999, vol. 47, no. 2, pp. 447–460.
- Marx E. Simulation of primary recrystallization. *Acta Mater*. 1999, vol. 47, no. 4, pp. 1219–1230.
- Manonukul A., Dunne N. Dynamic recrystallization. *Acta Mater*. 1999, vol. 47, no. 7, pp. 4339–4354.
- Ding R., Guo Z.X. Microstructural modeling of dynamic recrystallization using an extended cellular automaton approach. *Computational Materials Science*. 2002, no. 23, pp. 209–218.
- Goetz R.L., Seetharaman V. Modeling dynamic recrystallization using cellular automata. *Scripta Materialia*. 1998, vol. 38, no. 3, pp. 405–413.
- Getmanets V.V., Shevchuk V.Ya. *Ratsional'nye rezhimy raboty blyuminga* [Rational modes of blooming]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 136 p. (In Russ.).
- Chekmarev A.P., Pavlov V.L., Meleshko V.I., Tokarev V.A. *Teoriya prokatki krupnykh slitkov* [Theory of large ingots rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 252 p. (In Russ.).
- Dzugutov M.Ya. *Plastichnost' i deformiruemost' vysokolegirovannykh staley i splavov* [Plasticity and deformability of high-alloyed steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 303 p. (In Russ.).
- Birza V.V., Birza A.V. Steel classification according to plasticity limit under forming. *Stal'*. 2010, no. 7, pp. 66–71. (In Russ.).
- Simachev A.S., Oskolkova T.N., Temlyantsev M.V. Influence of non-metallic inclusions of rail steel on its high-temperature plasticity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 2, pp. 134–137. (In Russ.).

21. Golubtsov V.A., Shubya L.G., Usmanov P.G. Out-of-furnace processing and modification of steel. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2006, no. 11, pp. 47–51. (In Russ.).
22. Gubenko S.I., Parusov V.V., Derevyanchenko I.V. *Nemetallicheskie vklyucheniya v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk: ART PRESS, 2005, 536 p. (In Russ.).
23. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Development of theoretical basis of determining energy-power parameters of rolling at implementation of new grades of rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 804–810. (In Russ.).
24. Umansky A.A., Dumova L.V., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150. Available at URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/150/1/012029/pdf> (Accessed 20.12.2018).
25. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Improving rail rolling modes in crimping stands of the universal rail and structural steel mill. *Chernye metally*. 2016, no. 11, pp. 16–21. (In Russ.).
26. Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow: Al'yans, 2012, 643 p. (In Russ.).
27. Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow: Al'yans, 2013, 528 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed in SibGIU using the equipment of the Center for Collective Use "Materials Science" in frame of the basic part of the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 11.6365.2017 / 8.9.

Information about the authors:

A.A. Umanskii, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Ferrous Metallurgy"* (umanskii@bk.ru)

A.V. Golovatenko, *Cand. Sci. (Eng.), Director of Rail Production* (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)

A.S. Simachev, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"* (simachev_as@mail.ru)

V.V. Dorofeev, *Dr. Sci. (Eng.), Chief Calibrator* (Vladimir.Dorofeev@evraz.com)

T.N. Oskolkova, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"* (oskolkova@kuz.ru)

Received November 11, 2018

Revised March 18, 2019

Accepted March 20, 2019