

А.А. Уманский¹, А.В. Головатенко², А.С. Симачев¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО-ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ РЕЛЬСОВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ*

В последние годы в России имеет место четко выраженная тенденция по увеличению объема грузоперевозок железнодорожным транспортом, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке (Восточный полигон). Так, если увеличение грузонапряженности пути в 2018 г. по сравнению с 2010 г. в целом по России составило 24 %, то на Восточном полигоне зафиксировано увеличение грузонапряженности на 34 %. Этот факт в совокупности с усложненными условиями эксплуатации рельсов (климатические условия, план пути) приводит к снижению эксплуатационной стойкости рельсов. По имеющимся данным относительная вероятность изломов рельсов на участках пути с радиусом менее 650 м в 2,5 раза выше по сравнению с прямыми участками, а при температуре окружающей среды в диапазоне от –20 °C до –30 °C вероятность изломов возрастает более, чем в 12 раз.

С целью повышения эксплуатационного ресурса рельсов предприятиями-производителями активно внедряются новые технологии производства такого вида продукции. В частности, за последние десять лет произошел переход на массовое производство дифференцированно-термоупрочненных рельсов взамен выпускаемых ранее объемно-закаленных [1, 2], внедрение и совершенствование современных технологий внепечной обработки стали позволило на порядок снизить загрязненность рельсов неметаллическими включениями, в несколько раз уменьшить содержание газов [3 – 11].

Несмотря на такие изменения технологических режимов производства рельсов и улучшения показателей их качества, проблема преждевременного выхода из строя рельсов при эксплуатации по-прежнему остается актуальной, что в значительной степени связано с вышепри-

веденными данными о росте грузонапряженности пути. Так, в 2018 г. изъято почти 160 тысяч штук дефектных и остродефектных рельсов, что превышает показатель 2006 г. более, чем в 1,5 раза. Одной из основных причин изъятия рельсов являются контактно-усталостные дефекты, возникновение которых большинство исследователей связывает со скоплениями неметаллических включений [12 – 16]. При этом по вопросу степени влияния конкретного типа включений на эксплуатационный ресурс рельсов единого мнение отсутствует [17 – 22]. Ряд авторов утверждает, что наиболее отрицательно на стойкость рельсов влияют глинозем, карбиды и нитриды титана, другие исследователи отводят ведущую роль хрупкоразрушенным сложным оксидам.

Вышеприведенные данные обуславливают актуальность проведения исследований микроструктуры дифференцированно-термоупрочненных рельсов, в том числе состава, распределения и концентрации неметаллических включений.

В настоящей работе исследовали пробы рельсов типа Р65 текущего производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), в том числе категории ДТ350 (дифференцированно-термоупрочненные с прокатного нагрева общего назначения), изготовленные из стали марки Э76ХФ, и рельсы категории ДТ370ИК (дифференцированно-термоупрочненные с прокатного нагрева повышенной износостойкости и контактной выносливости), изготовленные из стали марки Э90ХАФ. Следует отметить, что рельсы категории ДТ350 в настоящее время являются основным видом рельсовой продукции, поставляемой для АО «РЖД»; рельсы категории ДТ370ИК, как правило, укладываются на участках с наиболее тяжелыми

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» СибГИУ в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.6365.2017/8.9.

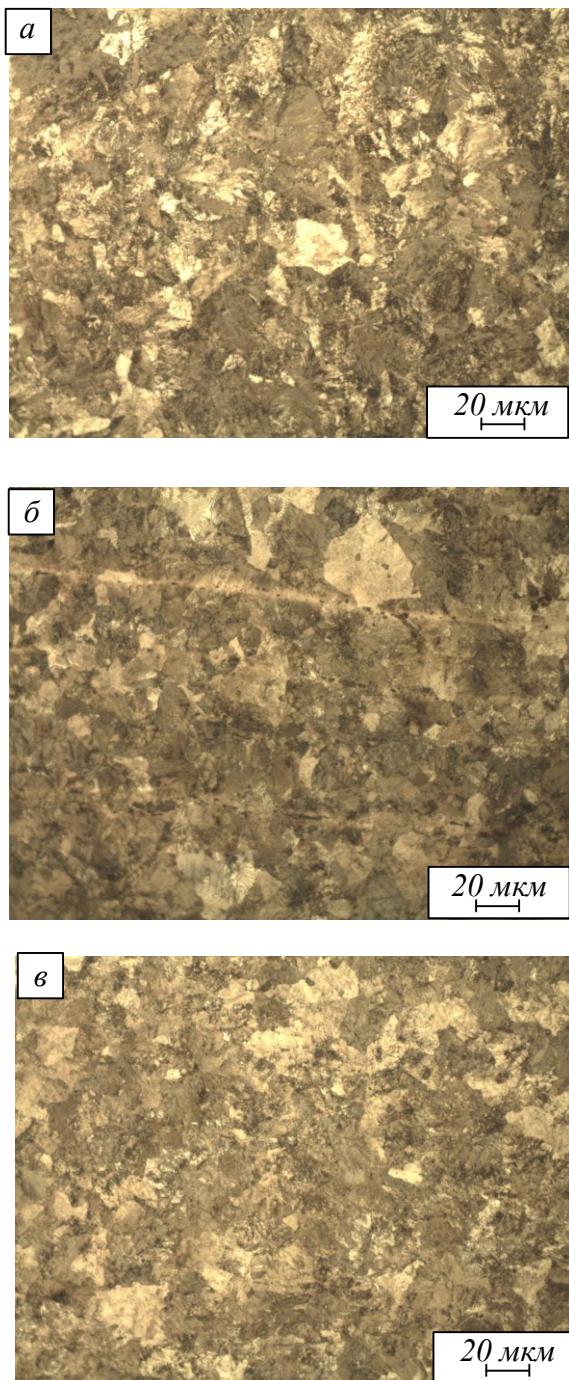


Рис. 1. Микроструктура головки (а), шейки (б) и подошвы (в) рельсов категории ДТ350

условиями эксплуатации, однако при этом имеются перспективные планы по переходу на массовое использование рельсов этой категории.

Исследования микроструктуры рельсов, в том числе загрязненности неметаллическими включениями, проводили по элементам профиля с использованием оптического металлографического микроскопа OLYMPUS GX-51.

По полученным данным величина зерна в головке рельсов исследуемых категорий ДТ350 и ДТ370ИК соответствует № 9 и № 10, в шейке и подошве – № 8 и № 9. Микроструктура по элементам рельсовых профилей практически аналогична

(рис. 1, 2) и представлена сорбитом закалки в головке, перлитом – в шейке и подошве; при этом в шейке рельсов категории ДТ350 выявлена незначительная химическая неоднородность в виде светлых полос, вытянутых в направлении прокатки и перпендикулярных подошве (рис. 1, б).

Исследования загрязненности неметаллическими включениями по элементам рельсовых профилей, проведенные по стандартной методике полукачественного анализа согласно ГОСТ 1778 – 70, показали (табл. 1), что преобладающим типом неметаллических включений являются силикаты недеформирующиеся, наиболь-

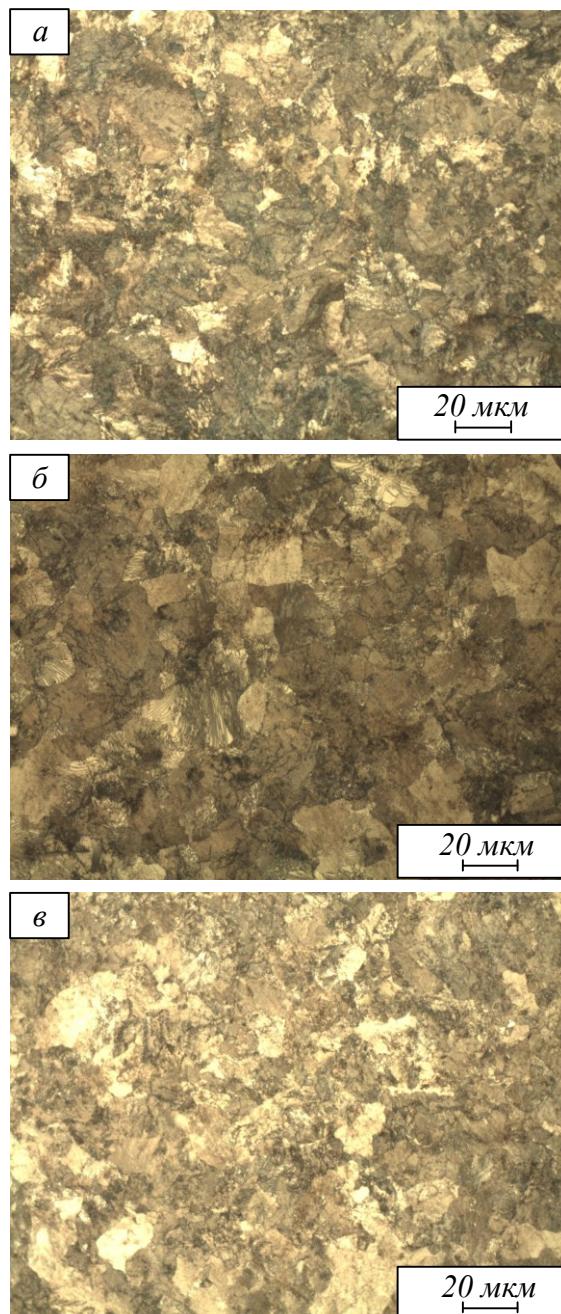


Рис. 2. Микроструктура головки (а), шейки (б) и подошвы (в) рельсов категории ДТ370ИК

шая концентрация которых наблюдается в шейке рельсов: в рельсах категории ДТ350 максимальный балл составил 4а (рис. 3, а), в рельсах категории ДТ370ИК – 3б (рис. 3, б). В головке рельсов также выявлено значительное количество сульфидов: максимальный балл составил 3б (рис. 3, в) для рельсов обеих категорий. Кроме указанных типов включений выявлены оксиды точечные и строчечные, силикаты пластичные и нитриды алюминия. При этом загрязненность перечисленными типами включений заметно выше в рельсах категории ДТ350.

С целью более точного определения вида, распределения по размерам и относительной концентрации неметаллических включений про-

ведены дополнительные исследования с использованием спектрометра «ARL iSpark» (метод «Spark-DAT»).

По полученным данным силикаты недеформирующиеся представлены, в основном, квартцем SiO_2 , сульфиды – сульфидами марганца MnS (табл. 2). При этом, в отличие от результатов полукачественного анализа, значимого различия в относительной концентрации типов включений по элементам и категориям рельсов не обнаружено. Это объясняется преобладанием включений малого (менее 4 мкм) размера, не выявляемых при проведении металлографических исследований. Также следует отметить, что наибольшую относительную концентрацию

**Распределение неметаллических включений
по элементам рельсовых профилей**

Вид включения	Максимальный балл включений по элементам рельса			
	головка		шейка	подошва
	боковая часть	центральная часть		
<i>Рельсы категории ДТ350 (сталь Э76ХФ)</i>				
Силикаты недеформирующиеся	26	16	4а	3б
Сульфиды	3б	—	—	—
Оксиды точечные	1а	—	1а	—
Силикаты пластичные	—	3б	2а	—
Нитриды алюминия	—	1б	2б	3б
<i>Рельсы категории ДТ370ИК (сталь Э90ХАФ)</i>				
Силикаты недеформирующиеся	2а	1б	3б	2б
Сульфиды	—	3б	—	3б
Оксиды строчечные	2а	—	—	—
Силикаты пластичные	1а	2б	1б	—
Нитриды алюминия	—	—	—	1б

имеют сульфиды марганца, а концентрация остальных типов включений значительно ниже: кварца в среднем в пять раз, глиноземистых включений – в 20 и более раз. Касательно различий в размерах глиноземистых включений по категориям рельсов можно отметить, что доля относительно крупных (более 10 мкм) включений $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{CaS}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ несколько выше для рельсов общего назначения категории ДТ350 по отношению к рельсам категории ДТ370ИК.

В целом можно констатировать, что загрязненность рельсов исследуемых категорий непластичными силикатными и глиноземистыми включениями является низкой с учетом их относительной концентрации и размеров.

Выходы. Проведенными металлографическими исследованиями дифференцированно-термоупрочненных рельсов различных категорий (рельсов общего назначения категории ДТ350, рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости категории ДТ370ИК) производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» определено, что величина зерна и микроструктура по элементам рельсовых профилей практически аналогична, за исключением выявленной незначительной химической неоднородности в рельсах общего назначения. Величина зерна в головке рельсов соответствует № 9 и № 10, в шейке и подошве – № 8 и № 9, микроструктура представлена сорбитом закалки в головке, перлитом – в шейке и подошве.

Исследования неметаллических включений показали, что загрязненность рельсов как общего назначения (категории ДТ350), так и рельсов

повышенной износостойкости и контактной выносливости (категории ДТ370ИК) непластичными силикатными и глиноземистыми включениями является низкой с учетом их относительной концентрации и размеров. Наибольшую относительную концентрацию в рельсах обеих категорий имеют сульфиды марганца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорофеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию 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.
2. 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, Новокузнецк, 15 – 16 декабря 2015 г. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. С. 44 – 48.
3. Уманский А.А., Козырев Н.А., Бойков Д.В., Думова Л.В. Совершенствование внепечной обработки рельсовой стали на агрегате "ковш-печь" с целью повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XX Международной

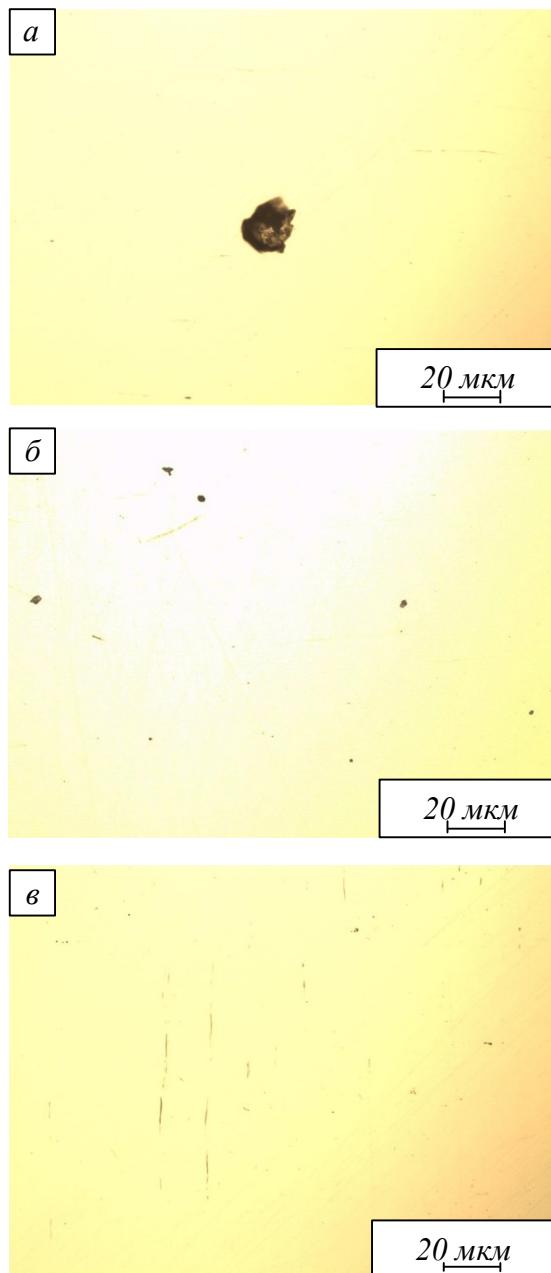


Рис. 3. Характерные неметаллические включения по элементам рельсов:
а и б – силикаты недеформирующиеся в шейке рельсов категории ДТ350 и ДТ370ИК;
в – сульфиды в головке рельсов

- научно-практической конференции. Ч. 2. Новокузнецк, 15 – 16 ноября 2017 г. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. С. 44 – 48.
4. Козырев Н.А., Уманский А.А. Повышение качества длинномерных железнодорожных рельсов за счет совершенствования технологических приемов производства рельсовой стали // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 77 – 81.
5. Козырев Н.А., Бойков Д.В., Уманский А.А. Исследование влияния технологических параметров внепечной обработки рельсовой стали в электросталеплавильном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» на качество рельсового

- проката. – В кн.: Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2014. Вып. 33. С. 25 – 31.
6. Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В. Разработка эффективных технологий раскисления и внепечной обработки рельсовой электростали, обеспечивающих повышение качества рельсов. – В кн.: Актуальные проблемы современного машиностроения: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Томск: изд. Томского политехнического университета, 2014. С. 238 – 243.

Таблица 2

**Относительная концентрация и размеры неметаллических включений
по элементам рельсовых профилей**

Тип включения	Относительная концентрация включений, ррм (распределение включений по размерам [*] , %)			
	рельсы категории ДТ350		рельсы категории ДТ370ИК	
	головка	шейка	головка	шейка
SiO ₂	7,73 (100/0/0)	9,27 (100/0/0)	3,35 (100/0/0)	14,92 (100/0 0)
MnS	34,86 (100/0/0)	30,78 (56,2/43,8/0)	35,04 (59,9/29,9/10,2)	43,35 (72,6/15,2/12,2)
Al ₂ O ₃	0,28 (52,6/18,4/29,0)	0,30 (66,7/8,3/25,0)	0,18 (61,4/15,9/22,7)	0,11 (65,8/8,6/25,6)
Al ₂ O ₃ – CaO – MgO	1,54 (29,5/16,7/53,8)	0,95 (37,5/16,6/45,9)	1,33 (50,4/19,8/29,8)	1,60 (52,5/13,8/33,8)
Al ₂ O ₃ – CaO – MgO – CaS	0,88 (24,3/18,3/57,5)	1,22 (33,3/16,7/50,0)	1,19 (38,8/20,4/40,7)	0,88 (53,6/7,3/39,1)
Al ₂ O ₃ – CaO	0,34 (47,9/27,9/24,1)	0,31 (53,4/13,2/33,3)	0,33 (48,5/22,6/29,0)	0,19 (60,0/10,0/29,9)
Al ₂ O ₃ – MgO	0,31 (30,1/19,9/50,0)	0,30 (50,0/10,0/40,0)	0,03 (44,8/20,8/34,4)	0,08 (57,8/7,6/34,6)

*Через косую приведены значения для размеров включений менее 4, 4 – 10 и более 10 мкм.

7. Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В. Исследование влияния параметров внепечной обработки стали на загрязненность рельсового проката оксидными включениями. – В кн.: Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции, Екатеринбург. 15 – 18 декабря 2014 г. – Екатеринбург: изд. Уральского федерального ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 247 – 250.
8. Козырев Н.А., Протопопов Е.В., Уманский А.А., Бойков Д.В. Совершенствование технологии раскисления и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения качества рельсового проката // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 10. С. 721 – 727.
9. Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В. Исследование влияния параметров внепечной обработки на образование оксидных неметаллических включений в рельсовой электростали. – В кн.: Сборник трудов XIII Международного конгресса сталеплавильщиков, Полевской, 12 – 18 октября 2014 г. – Москва-Полевской, 2014. С. 180 – 183.
10. Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В. Исследование и оптимизация технологии производства рельсовой электростали с целью повышения качества рельсового проката и технико-экономических показателей его производства // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 3 (9). С. 11 – 16.
11. Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В. Разработка технологии внепечной обработки рельсовой электростали, обеспечивающей повышение эксплуатационной стойкости рельсов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 4 (1000). С. 29 – 33.
12. Георгиев М.Н., Межкова Н.Я., Морозов Е.М., Рейхарт В.А. О механизме развития контактно-усталостных трещин в железнодорожных рельсах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. № 9. С. 50 – 52.
13. Бели Я., Немет И. Контактно-усталостные трещины в головке рельса // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 5. С. 33 – 37.
14. Рейхарт В.А. Анализ дефектов рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 4. С. 22 – 25.
15. Абдурашитов А.Ю. Закономерности образования контактно-усталостных дефектов // Путь и путевое хозяйство. 2002. № 11. С. 16 – 20.
16. Павлов В.В., Корнева Л.В. Разработка методики оценки склонности рельсовой стали к образованию дефектов контактно-усталостного происхождения. – В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений. Сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26 – 29 октября 2010 г. – Екатеринбург: изд-во ОАО «Уральский институт металлов», 2011. С. 117 – 137.

17. Павлов В.В., Корнева Л.В., Полевой Е.В., Волков К.В. Оценка склонности рельсов к образованию контактно-усталостных дефектов. – В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений. Сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23 – 25 октября 2012 г. – Екатеринбург: изд. Уральского института металлов, 2013. С. 106 – 112.
18. Добужская А.Б., Дерябин А.А., Сырейщикова В.И. Исследование неметаллических включений в рельсах и очагах контактно-усталостных дефектов. – В кн.: Неметаллические включения в рельсовой стали. Сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара. – Екатеринбург: изд. Уральского института металлов, 2005. С. 41 – 58.
19. Шур Е.А., Трушевский С.М. Влияние неметаллических включений на разрушение рельсов и рельсовой стали. – В кн.: Неметаллические включения в рельсовой стали. Сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара. – Екатеринбург: изд. Уральского института металлов, 2005. С. 87 – 94.
20. Добужская А.Б., Голицын Г.А., Сырейщикова В.И. Исследование структуры рельсов с разной стойкостью против образования контактно-усталостных дефектов. – В кн.: Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. Сборник научных трудов по материалам II Всероссийского научно-технического семинара, Екатеринбург, 16 – 17 мая 2006 г. – Екатеринбург: изд. Уральского института металлов, 2006. С. 64 – 80.
21. Капустина Е.С. Сравнение методов оценки неметаллических включений в рельсовой стали производства ОАО «НТМК». – В кн.: Неметаллические включения в рельсовой стали. Сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара, Екатеринбург, 2005. – Екатеринбург: изд. Уральского института металлов, 2005. С. 95 – 101.
22. Трушникова А.С., Григорович К.В., Шибаев С.С. Сравнение методов контроля неметаллических включений для оценки качества железнодорожных рельсов. – В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений. Сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Калуга, 1 – 2 октября 2009 г. – Екатеринбург: изд. Уральского института металлов, 2010. С. 116 – 124.

© 2019 г. А.А. Уманский, А.В. Головатенко,

А.С. Симачев

Поступила 14 октября 2019 г.