

Особенности микроструктуры дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов производства АО “ЕВРАЗ ЗСМК”

А. А. УМАНСКИЙ¹, канд. техн. наук, А. В. ГОЛОВАТЕНКО², канд. техн. наук, А. С. СИМАЧЕВ¹, канд. техн. наук, Л. В. ДУМОВА¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия (umanskii@bk.ru)

² АО “ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат”, г. Новокузнецк, Россия

Исследована микроструктура дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов текущего производства АО “ЕВРАЗ ЗСМК”. Определены типы неметаллических включений и их состав. Изучены процессы ликвации основных химических элементов рельсовых сталей (C, Si, Mn, Cr, S, P) и изменение твердости по сечению рельсовых профилей. Показано, что характерными неметаллическими включениями являются недеформирующиеся силикаты, наиболее сконцентрированные в шейке рельсов и пластичные сульфиды, сосредоточенные преимущественно в их головке. Для ряда рельсов выявлена химическая неоднородность со скоплениями неметаллических включений в шейке профиля.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы; дифференцированная термообработка; микроструктура, неметаллические включения; механические свойства; химическая неоднородность; твердость.

ВВЕДЕНИЕ

В России железные дороги традиционно играют ключевую роль в структуре грузооборота — доля грузов, перевозимых железнодорожным транспортом, составляет порядка 85 – 90 %.

В связи с этим качество и эксплуатационная стойкость железнодорожных рельсов, определяющие пропускную способность железных дорог, оказывают значительное влияние на эффективность функционирования различных отраслей отечественной промышленности.

До 2013 г. железнодорожные рельсы в России производились на прокатных станах линейного типа конструкции 30-х годов XX века. При этом к началу XXI века отечественные рельсы по ряду ключевых

параметров значительно уступали рельсам ведущих мировых производителей: “Nippon Steel Corporation” (Япония), “Thyssen Krupp Stahl” (Германия), “Voestalpine Schienen GmbH” (Австрия), “Tata Steel” (Франция). Одной из основных причин такой ситуации являлось применение устаревшей технологии объемной закалки рельсов в масле [1], в то время как зарубежные производители используют дифференцированную закалку в различных средах (полимеры, сжатый воздух) (табл. 1). Указанное несоответствие качества рельсов отечественного производства привело к необходимости закупки АО “РЖД” рельсов в значительных объемах за рубежом [2, 3] — в период с 2010 г. по 2013 г. доля импортных рельсов составляла 18 – 39 % от общей доли закупок.

Таблица 1. Виды закалки железнодорожных рельсов

Производитель рельсов	Нагрев под закалку	Метод закалки
Voestalpine Schienen GmbH (Австрия)	Прокатный нагрев	ДЗ* в растворе полимера
Tata Steel (Франция)	Отдельный объемный нагрев ТВЧ	ДЗ сжатым воздухом
Nippon Steel Corporation (Япония)	Прокатный нагрев	ДЗ сжатым воздухом
ЕВРАЗ ЗСМК (Россия) до 2013 г.		Объемная закалка в масле
ЕВРАЗ ЗСМК (Россия) после 2013 г.		ДЗ сжатым воздухом
Мечел (Россия) после 2013 г.		ДЗ в растворе полимера

* Дифференцированная закалка.



Рис. 1. Схемы отбора проб из образцов рельсов различных плавок для проведения исследований

В 2013 г. проведена коренная реконструкция отечественного рельсового производства. Введены в эксплуатацию современные универсальные рельсобалочные станы в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (ЕВРАЗ «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат») и ПАО «Мечел», основной продукцией которых являются дифференцированно термоупрочненные длинномерные (длиной до 100 м) железнодорожные рельсы [4 – 6]. Термическая обработка рельсов на этих предприятиях проводится с прокатного нагрева [7, 8]. При этом в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в качестве закалочной среды используют сжатый воздух, а в ПАО «Мечел» — растворы полимеров.

Рельсы указанных производителей в сжатые сроки прошли процедуру сертификации и с 2014 г. потребность в них в АО «РЖД» полностью обеспечивается. С этого времени рельсовая продукция зарубежных производителей для отечественных железных дорог не закупается.

Несмотря на тот факт, что в настоящее время железнодорожные рельсы отечественного производства по качеству не уступают, а по ряду показателей и превосходят рельсы ведущих мировых производителей, по-прежнему актуальной остается проблема повышения их эксплуатационной стойкости и снижения преждевременного и аварийного выхода из строя в пути. Указанная ситуация обусловлена постоянным повышением грузонапряженности отечественных железнодорожных путей, в особенности на восточном полигоне (Восточная Сибирь, Дальний Восток), где вследствие климатических особенностей (продолжительный зимний период с температурами ниже -20°C) и географического ландшафта (значительная доля участков с кривизной малого радиуса менее 650 м) эксплуатационная стойкость рельсов является наиболее низкой.

Одним из потенциально наиболее эффективных направлений увеличения эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов является повышение

качества их микроструктуры, в том числе снижение загрязненности неметаллическими включениями. При этом фактором, сдерживающим развитие данного направления, является недостаточный объем научно-обоснованных данных о процессах формирования микроструктуры рельсов в условиях их производства на новых отечественных рельсобалочных станах, что связано с незначительной длительностью эксплуатации указанных станов. Следует также отметить, что при переходе на производство рельсов в условиях новых прокатных станов изменения коснулись не только технологии их прокатки и термической обработки, но и производства исходных непрерывнолитых заготовок. В частности, значительным изменениям подвергся химический состав рельсовых сталей. Так, если ранее для массового производства рельсов использовалась сталь 76Ф, то в настоящее время основной объем рельсов изготавливается из стали 76ХФ (рельсы категории ДТ350 — дифференцированно термоупрочненные с прокатного нагрева общего назначения). Значительный объем рельсов производится также из заэвтектидной стали 90ХАФ (рельсы категории ДТ370ИК — дифференцированно термоупрочненные с прокатного нагрева повышенной износостойкости и контактной выносливости).

Цель настоящей работы — исследование параметров микроструктуры дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов различных категорий, в том числе изучение распределения характерных неметаллических включений по профилю рельсов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали образцы рельсов текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» категорий ДТ350 (сталь Э76ХФ) и ДТ370ИК (сталь Э90ХАФ), отобранные от различных элементов рельсовых профилей (рис. 1). Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 2.

Изучение неметаллических включений проводили с использованием стандартной методики по ГОСТ 1778–70 на нетравленных шлифах с увеличением $\times 100$ (металлографический световой микроскоп OLYMPUS GX-51) и по методике «Spark-DAT» (Spark Data Analysis and Treatment) на спектрометре «ARL iSpark». Сущность методики Spark-DAT заключается в разделении интенсивности сигнала фотоэлектронного умножителя на пики низкой интенсивности, которые относят к основному металлу, и пики высокой интенсивности, характерные для неметаллических включений [9 – 11]. В рамках методики «Spark-DAT» на первом этапе применяли метод «Стандартного анализа включений», в котором количество включений определяется как число пиков отдельного элемента или как число совпадений пиков



Рис. 2. Характерные неметаллические включения в железнодорожных рельсах:

a — недеформирующиеся силикаты в шейке рельсов (балл 4а); *б* — сульфиды в головке рельсов (балл 3б)

различных элементов. Для определения концентрации некоторых специфических видов включений, таких как алюминаты, сульфиды и силикаты, применяли метод “Расширенного анализа включений” в качестве предустановленной модели. Для каждого образца проведено четыре измерения. Следует отметить, что спектрометр “ARL iSpark” имеет ограничение по диапазону размеров выявляемых неметаллических включений — не идентифицируются включения размерами менее 1 – 2 мкм и более 10 – 15 мкм. При этом методика “Spark-DAT” позволяет разбить выявляемые включения на условные группы в зависимости от их размера. В данном исследовании включения разбиты на три группы: малые (2 – 6 мкм), средние (6 – 10 мкм) и крупные (более 10 мкм). Исследования микроструктуры термически обработанных рельсов проводили на шлифах после травления с использованием стандартной методики по ГОСТ 5639–82.

Дополнительно исследовали ликвацию основных химических элементов рельсовых сталей (C, Si, Mg, Cr, S, P) по сечению рельсовых профилей с использованием рентгенофлуоресцентного спектрального анализа по ГОСТ 28033–89 (спектрометр “Shimadzu XRF-1800”) и фотоэлектрического спектрального анализа по ГОСТ 18895–97 (спектрометр ДФС-71). Степень ликвации L (%) определяли по формуле:

$$L = (C_x - C_{\text{ковш}}) / C_{\text{ковш}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где C_x — концентрация химического элемента в пробе рельса в месте замера, %; $C_{\text{ковш}}$ — концентрация химического элемента в ковшевой пробе для плавки стали, из которой произведен рельс, %.

Измерение твердости образцов, отобранных от различных элементов рельсовых профилей, проводили с использованием твердомера ТК-2М.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам анализа неметаллических включений, проведенного с использованием полуколичественной методики по ГОСТ 1778–70, установлено, что преобладающим типом включений независимо от категории рельсов являются недеформирующиеся силикаты (обнаружены во всех анализируемых пробах) (табл. 3). При этом наибольшие концентрация и размер таких включений наблюдаются в шейке рельсов — их максимальный балл составляет 4а по ГОСТ 1778–70 (рис. 2, *a*). В головке рельсов выявлена повышенная (по сравнению с другими элементами рельсового профиля) концентрация сульфидов — максимальный балл включений составляет 3б по ГОСТ 1778–70 (рис. 2, *б*). Следует отметить, что загрязненность неметаллическими включениями рельсов категории ДТ307ИК ниже, чем у рельсов категории ДТ350.

На основании анализа неметаллических включений, проведенного с использованием метода “Spark-DAT”, установлено, что среди включений си-

Таблица 2. Фактический химический состав сталей для железнодорожных рельсов производства АО “ЕВРАЗ ЗСМК”

Сталь	Содержание химических элементов, % (масс.)									
	C	Mn	Si	V	Cr	N	Cu	Ni	S	P
Э76ХФ (ДТ350)	0,72 – 0,80	0,82 – 0,97	0,39 – 0,56	0,03 – 0,07	0,36 – 0,54	0,006 – 0,012	0,07 – 0,14	0,05 – 0,11	0,009 – 0,018	0,008 – 0,015
Э90ХАФ (ДТ370ИК)	0,84 – 0,93	0,76 – 0,95	0,42 – 0,53	0,08 – 0,11	0,24 – 0,39	0,010 – 0,015	0,06 – 0,12	0,03 – 0,12	0,007 – 0,016	0,006 – 0,014

Примечание. В скобках дана категория рельсов.

Таблица 3. Распределение неметаллических включений по профилю железнодорожных рельсов

Тип неметаллических включений	Распределение включений (максимальный балл) по элементам рельса:		
	головка	шейка	подошва
Рельсы категории ДТ350 из стали Э76ХФ			
Силикаты недеформирующиеся	26/16	4a	3б
Сульфиды	3б/—	—	—
Оксиды точечные	1a/—	1a	—
Силикаты пластичные	—/3б	2a	—
Нитриды алюминия	—/16	2б	3б
Рельсы категории ДТ370ИК из стали Э90ХАФ			
Силикаты недеформирующиеся	16/16	3б	2б
Сульфиды	—/3б	—	2б
Оксиды строчечные	2a/—	—	—
Силикаты пластичные	1a/2б	1б	—

Примечание. В числителе приведены результаты исследования боковых проб, в знаменателе — центральных проб.

ликатного типа достаточно высокую концентрацию имеют только включения SiO_2 (табл. 4). При этом все выявленные включения данного типа имеют относительно малый размер (менее 2 мкм). Показано, что в рассматриваемом диапазоне размеров неметаллических включений наибольшую концентрацию имеют сульфиды марганца MnS . При этом, в отличие от приведенных выше результатов полуколичественного анализа, значимого различия концентраций MnS в головке и шейке рельса не установлено. Это обусловлено преобладанием включений малого размера, не выявляемых при металлографическом анализе с увеличением $\times 100$. Исследования также показали, что концентрация включений других типов крайне не-

значительна. В частности, концентрация сложных включений, имеющих в своем составе глинозем ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{CaS}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$) суммарно не превышает 3,1 ppm.

Проведенными исследованиями выявлена значительная ликвация С, Мп и S по сечению рельсов и в рамках их отдельных элементов (рис. 3). При этом ликвация по углероду обуславливает широкий диапазон твердости в рамках отдельных элементов рельсового профиля (табл. 5), а ликвация по сере, достигающая +100 % (отн.), — значительную концентрацию сульфидов.

Исследованиями микроструктуры рельсов установлено, что она является стандартной для дифференцированно термически упрочненных рельсов. Микроструктура головки представляет собой сорбит закалки (рис. 4, а), а шейки и подошвы — перлит (рис. 4, б, в). Размер зерна в головке рельса соответствует № 9 и № 10, в шейке и подошве — № 8 и № 9 по ГОСТ 5639–82, что свидетельствует об использовании оптимального режима нагрева заготовок под прокатку. Однако при этом в шейке ряда исследуемых рельсов выявлена химическая неоднородность (рис. 5, а), внутри полос которой расположены неметаллические включения (рис. 5, б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обобщение результатов исследований неметаллических включений в железнодорожных рельсах производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК", проведенных с использованием метода полуколичественного анализа (табл. 3) и методики "Spark-DAT" (табл. 4), позволяет утверждать, что характерными неметаллическими включениями в рельсах независимо от категории (марки стали) являются недеформирующиеся силикаты, представленные в основном включениями

Таблица 4. Относительная концентрация и размеры неметаллических включений в элементах железнодорожных рельсов

Включение	$C_{\text{вкл}}$, ppm			
	Рельсы стали Э76ХФ		Рельсы стали Э90ХАФ	
	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_2O_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)
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$	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)
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{CaS}$	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)
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$	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)
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$	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)

Обозначения: $C_{\text{вкл}}$ — относительная концентрация включений.

Примечание. В скобках дано содержание включений (в %), имеющих размеры, соответственно: менее 2 – 6 мкм/6 – 10 мкм/более 10 мкм.

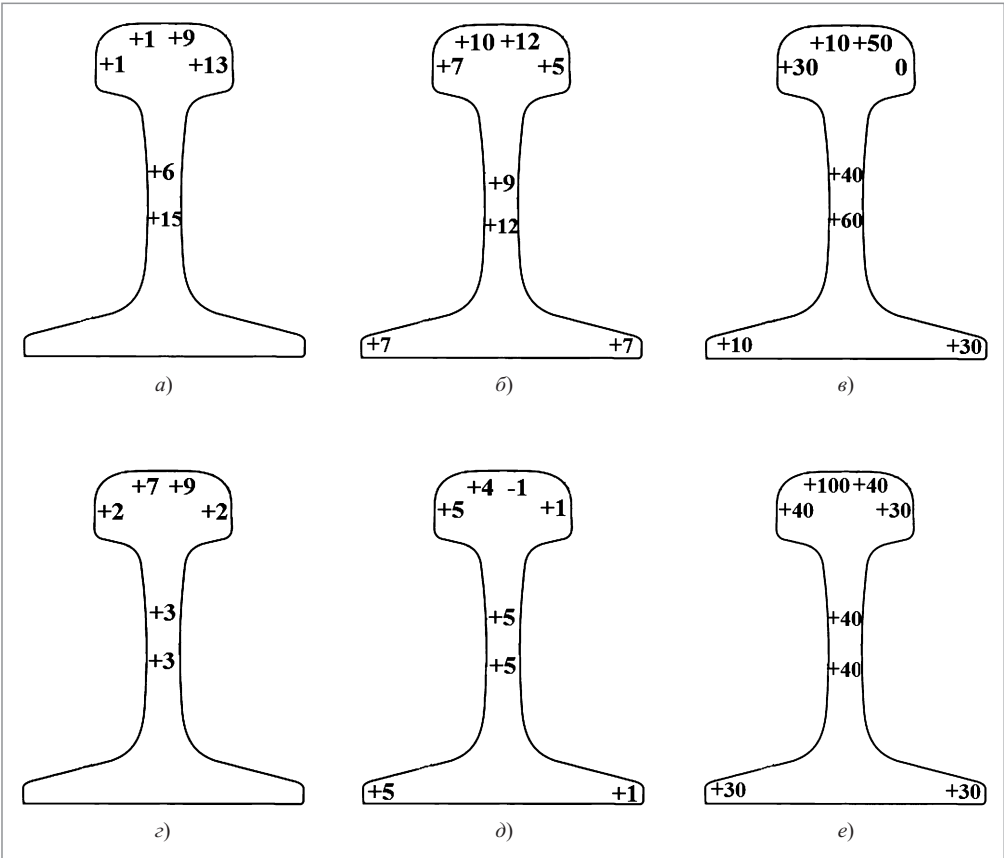


Рис. 3. Максимальная по выборке степень ликвации (цифры на рисунках в %) углерода (а, з), марганца (б, д) и серы (в, е) по сечению рельсов категории ДТ350 (а – в) и ДТ370ИК (з – е). Расчет по формуле (1)

SiO₂, и пластичные сульфиды MnS. При этом включения указанных типов относительно крупных размеров (выявляемые при использовании методики полуколичественного анализа с увеличением ×100) распределены неравномерно по профилю рельсов — сульфиды имеют наибольшую концентрацию в головке, а силикаты — в шейке рельсов.

Исходя из имеющихся представлений о влиянии неметаллических включений на эксплуатационную стойкость рельсов [12 – 15] потенциально негативное воздействие на нее могут оказать недеформирующиеся силикаты, расположенные в головке рельсов. При этом с учетом их невысокой концентрации данное влияние не имеет выраженного характера. Сложные включения на основе глинозема, являющиеся наиболее потенциально опасными с точки

зрения образования контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов [16 – 19], имеют крайне незначительную концентрацию (табл. 4), поэтому их влияние не является значимым.

Результаты исследований микроструктуры железнодорожных рельсов по элементам профиля (рис. 4) свидетельствуют об использовании оптимальных температурно-скоростных параметров дифференцированной закалки. Микроструктура всех элементов рельсового профиля является мелкозернистой: балл зерна не превышает № 9 по ГОСТ 5639–82 в головке и № 8 в подошве и шейке. При этом микроструктура шейки и подошвы соответствует горячекатаной перлитной стали и обладает достаточной пластичностью, а микроструктура головки

Таблица 5. Твердость элементов железнодорожных рельсов

Категория рельсов	Сталь	HB, кгс/мм ²		
		Головка	Шейка	Подошва
ДТ350	Э76ХФ	286 – 331/341 – 452	207 – 255	255 – 293
ДТ370ИК	Э90ХАФ	341 – 415/352 – 415	248 – 293	248 – 293

Примечание. В числителе приведена твердость боковых проб головки, в знаменателе — центральных проб.

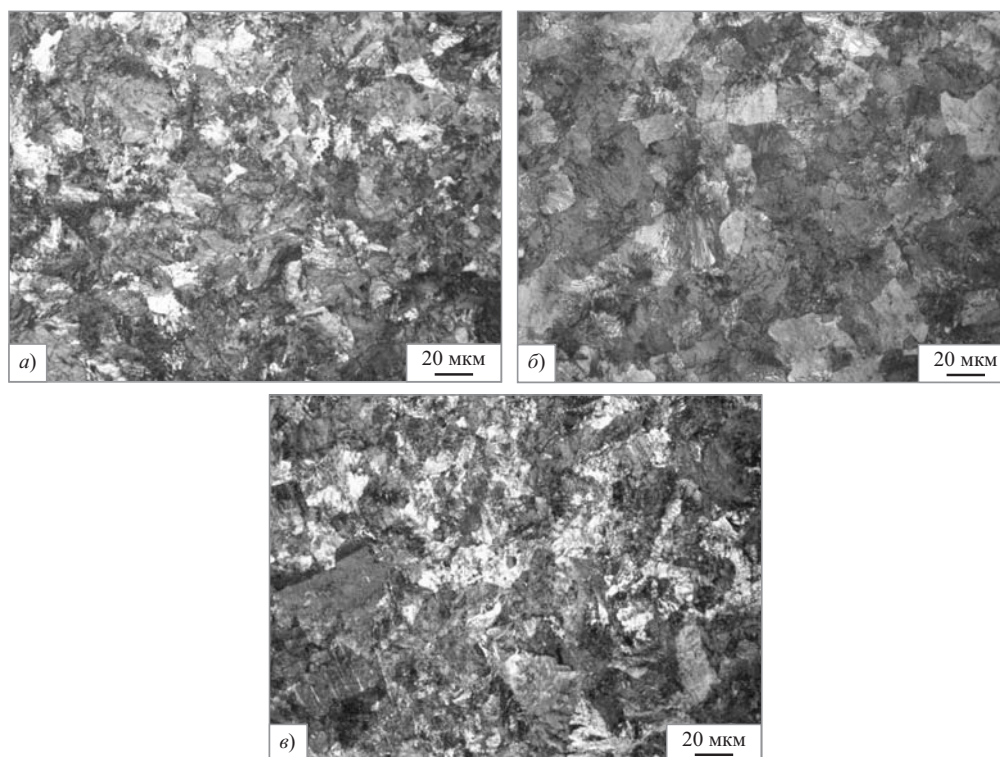


Рис. 4. Микроструктура головки (а), шейки (б) и подошвы (в) рельса категории ДТЗ70ИК

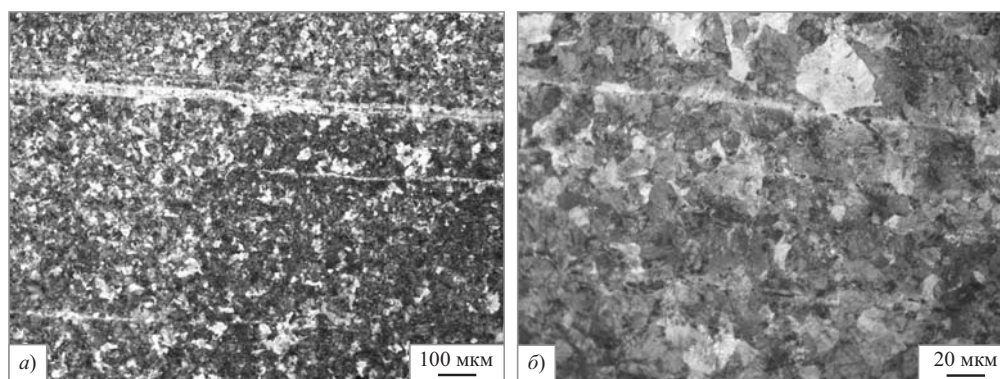


Рис. 5. Микроструктура шейки рельса категории ДТ350:

а — химическая неоднородность; б — неметаллические включения в полосах химической неоднородности

(сорбит) соответствует закаленной стали, обладающей повышенной твердостью.

Анализ результатов исследования микроструктуры рельсов показал, что в качестве негативного момента следует выделить наличие дефектов в виде полос химической неоднородности в шейке ряда рельсов (рис. 5). Такая структура обуславливает неравномерность механических свойств и, как следствие, снижает эксплуатационные характеристики рельсов. Следует отметить, что значимая химическая неоднородность (ликвация) выявлена также и на макроуровне — по элементам рельсовых профилей (рис. 4). Согласно общепринятым представлениям, химическая неоднородность формируется в непрерывнолитых

слитках, являющихся исходными заготовками для производства рельсов, в случае отклонения от оптимальных температурно-скоростных режимов разлива стали на машине непрерывного литья заготовок. Режимы прокатки и термической обработки рельсов не оказывают значимого влияния на развитие химической неоднородности. При этом использование оптимальных режимов прокатки позволяет предотвратить переход ликвационных дефектов из шейки в головку формирующегося рельсового профиля [20]. Таким образом, для условий АО “ЕВРАЗ ЗСМК” эффективным резервом повышения качества микроструктуры рельсов в настоящее время является со-

вершенствование технологии производства рельсовой стали.

На основании исследований микроструктуры дифференцированно термически упрочненных железнодорожных рельсов производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК" можно сделать следующие выводы.

ВЫВОДЫ

1. Распределение неметаллических включений по профилю рельсов имеет неравномерный характер — в шейке рельсов наибольшую концентрацию имеют недеформирующиеся силикаты, преимущественно в виде оксида кремния SiO_2 , а в их головке — пластичные сульфиды марганца MnS .

2. Микроструктура рельсов мелкозернистая, что свидетельствует о применении оптимальных температурно-скоростных режимов дифференцированной термической обработки.

3. В микроструктуре шейки ряда рельсов обнаружена химическая неоднородность со скоплениями неметаллических включений; химическая неоднородность выявлена также на макроуровне — между отдельными элементами рельсов и внутри них.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korneva L. V., Yunin G. N., Kozyrev N. A. et al. Quality comparison of ОАО НКМК and imported rails // *Steel in Translation*. 2010. V. 40, No. 12. P. 1047 – 1050.
2. Golovatenko A. V., Umansky A. A., Dorofeev V. V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 150(1). 012002.
3. Dement'ev V. P., Feiler S. V., Boikov D. V. et al. Operation of imported rail on the East Siberian Railroad // *Steel in Translation*. 2016. V. 46, No. 6. P. 395 – 400.
4. Полевой Е. В., Волков К. В., Головатенко А. В. и др. Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО "ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат" // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. № 4. С. 26 – 28.
5. Юрьев А. Б., Юнин Г. Н., Головатенко А. В. и др. Разработка и внедрение первой в России технологии производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Сталь*. 2016. № 11. С. 33 – 35.
6. Polevoi E. V., Yunin G. N., Golovatenko A. V., Temlyantsev M. V. New rail products at AO EVRAZ ZSMK // *Steel in Translation*. 2019. V. 49, No. 7. P. 484 – 488.
7. Polevoi E. V., Yunin G. N., Temlyantsev M. V. Differential heat treatment of rails by means of rolling heat // *Steel in Translation*. 2016. V. 46, No. 10. P. 692 – 700.
8. Polevoi E. V., Volkov K. V., Kuznetsov E. P. et al. Differential heat treatment of rails // *Steel in Translation*. 2014. V. 44, No. 7. P. 550 – 552.
9. Kuss H., Lungen S., Muller G. Comparison of spark OES methods for analysis of inclusions // *Anal. Bioanal. Chem*. 2002. V. 374, No. 11. P. 1242 – 1249.
10. Kuss H. M., Mittelstaedt H., Mueller G. Inclusion mapping and estimation of inclusion contents in ferrous // *Anal. At. Spectrom*. 2005. V. 20, No. 5. P. 730 – 735.
11. Бокк Д. Н., Лабузов В. А., Зарубин И. А. Определение неметаллических включений в металлических сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением // *Заводская лаборатория*. 2015. № 1. С. 92 – 97.
12. Polevoi E. V., Yunusov A. M., Yunin G. N. et al. Wear resistance of rails // *Steel in Translation*. 2019. V. 49, No. 7. P. 492 – 495.
13. Dobuzhskaya A. B., Galitsyn G. A., Yunin G. N. et al. Effect of chemical composition, microstructure and mechanical properties on the wear resistance of rail steel // *Steel in Translation*. 2020. V. 50, No. 2. P. 906 – 910.
14. Добужская А. Б., Смирнов Л. А., Мухранов Н. В. и др. Изучение состава неметаллических включений в рельсах // *Сталь*. 2015. № 5. С. 82 – 86.
15. Shur E., Borts A., Zakharov S. Rails for low operating temperature and high speed // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. V. 49. P. 221 – 232.
16. Shur E. A., Borts A. I., Bazanova L. V. et al. Determination of the fatigue crack growth rate and time in rails using fatigue macrolines // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. No. 4. P. 477 – 482.
17. Шур Е. А., Борц А. И., Сухов А. В. и др. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2015. № 3. С. 3 – 9.
18. Шур Е. А., Борц А. И., Сухов А. В. и др. Образование контактноусталостных дефектов в головках рельсов // *Железнодорожный транспорт*. 2015. № 12. С. 34 – 38.
19. Umansky A. A., Kozyrev N. A., Boykov D. V., Dumova L. V. Improvement of the extra-furnace rail steel processing on the ladle-furnace unit in order to increase the operational stability of railway rails // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 411(1). 012078.
20. Дорофеев В. В., Добрянский А. В., Каретников А. Ю. и др. Анализ формоизменения осевой пористости при универсальной прокатке рельсов в зависимости от схемы деформации в черновых калибрах // *Сталь*. 2012. № 11. С. 32 – 35.

Статья поступила в редакцию 21.12.2021 г.

Special features of the microstructure of differentially heat-hardened railway rails produced by the "EVRAZ ZSMK" Company

A. A. Umanskii¹, A. V. Golovatenko², A. S. Simachev¹, and L. V. Dumova¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² "EVRAZ ZSMK" Company (United West-Siberian Iron and Steel Works) Novokuznetsk, Russia

The microstructure of differentially heat-treated railroad rails produced by the EVRAZ ZSMK Company is studied. The types of the nonmetallic inclusions and their compositions are determined. The processes of segregation of the main chemical elements of the rail steels (C, Si, Mn, Cr, S, P) and the variation of the hardness over cross section of rail profiles are investigated. It is shown that the typical nonmetallic inclusions are undeformable silicates concentrated chiefly in the necks of the rails and plastic sulfides concentrated in their heads. Some of the rails exhibit chemical heterogeneity with clusters of nonmetallic inclusions in the necks.

Keywords: railroad rails, differentiated heat treatment, microstructure, nonmetallic inclusions, mechanical properties, chemical heterogeneity, hardness.