

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.01

УДК 621.785

Е.В. Полевой¹, А.Б. Добужская², М.В. Темлянцев³¹ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», Новокузнецк, Россия² ОАО «Уральский институт металлов», Екатеринбург, Россия³ Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ ВАНАДИЕМ И НИОБИЕМ

Общемировые тенденции в производстве железнодорожных рельсов направлены на увеличение длины рельсов, повышение их твердости, снижение уровня внутренних остаточных напряжений, обеспечение дифференцированного по сечению профиля уровня свойств, а также применение ресурсосберегающих технологий термической обработки с использованием экологически чистых охлаждающих сред и использование экономнолегированных марок сталей. Для того чтобы выпускаемая продукция соответствовала современным требованиям, в 2012–2013 гг. на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведена коренная реконструкция рельсового производства с освоением технологии дифференцированного термоупрочнения железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева. В ходе освоения новой технологии был проведен ряд научно-исследовательских работ по выявлению оптимального химического состава и режимов термической обработки рельсов. В данной работе представлены результаты исследования средствами электронной микроскопии микроструктуры рельсовых сталей четырех различных химических составов на основе стали перлитного класса марки Э76ХФ по ГОСТ Р 51685, отличающихся содержанием углерода, марганца, кремния, хрома, ванадия. Кроме того, две опытных плавки дополнительно микролегировали ниобием. Исследование проводили на образцах, вырезанных из нетермоупрочненных рельсов типа Р65, прокатанных из непрерывнолитых заготовок плавок опытного химического состава. Образцы перед исследованием нагревали до температуры 950 °С и подвергали ускоренному охлаждению в воздушной среде со скоростью 1–5 град/с. По результатам исследования установлено влияние содержания основных и микролегирующих химических элементов на параметры микроструктуры рельсов. Определены рациональные скорости охлаждения рельсовой стали различного химического состава, обеспечивающие формирование наиболее благоприятных параметров структуры металла. Установлено, что наиболее однородная микроструктура мелкодисперсного перлита в более широком диапазоне скоростей охлаждения (до 3 град/с) формируется в рельсовой стали с умеренным содержанием хрома (0,46 %), марганца (0,78 %), повышенным содержанием кремния (0,55 %), содержанием углерода, близким к эвтектоидному составу (0,79 %), микролегированной ванадием в количестве 0,07 %.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, рельсы, микроструктура, термическая обработка, скорость охлаждения, перлит, бейнит, ферритная сетка, микролегирование, ванадий, ниобий, воздушная среда, химический состав, электронная микроскопия.

E.V. Polevoy¹, A.B. Dobuzhskaya², M.V. Temlyantsev³

¹ JSC "EVRAZ ZSMK", Novokuznetsk, Russian Federation

² JSC "Ural Institute of Metals", Ekaterinburg, Russian Federation

³ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

INFLUENCE OF SPEED OF COOLING ON FORMATION OF STRUCTURE OF A RAIL STEEL MICROALLOYED BY VANADIUM AND NIOBIUM

Universal tendencies in manufacture of railway rails are directed on increase in length of rails, increase of their hardness, decrease in level of internal residual pressure, maintenance of the profile of level of properties differentiated on section, and also application of technologies of thermal processing saving up resources with use of non-polluting cooling environments and use is economical – the alloyed marks of steels. For the purpose of maintenance of let out production to modern requirements in 2012-2013 on joint-stock company "EVRAZ ZSMK" radical reconstruction of rail manufacture with development of technology of the differentiated heat hardening of railway rails with use of heat of rolling heating is spent. During development of new technology a number scientifically-research works on revealing of an optimum chemical composition and modes of thermal processing of rails has been spent. In the given work results of research by means of electronic microscopy of a microstructure of rail steels of four various chemical compounds on the basis of a perlitic steel of mark Э76ХФ in accordance with GOST R 51685 carbon different by the maintenance, manganese, silicon, chrome, vanadium are presented. Besides, two skilled fusions in addition micro alloyed by niobium. Research spent on the samples who have been cut out from not heat strengthened rails of type P65, rolled from continuously cast preparations of swimming trunks of a skilled chemical compound. Samples before research heated up to temperature 950 °C and subjected to the accelerated cooling in the air environment with a speed of 1-5 degrees a second. By results of research influence of the maintenance of the basic and microalloying chemical elements on parametres of a microstructure of rails is established. Rational speeds of cooling of a rail steel of the various chemical compound, providing formation of optimum parametres of structure of metal are defined. It is established that the most homogeneous microstructure Small disperse a perlite in wider range of speeds of cooling (to 3 degrees a second) is formed in a rail steel with the moderate maintenance of chrome (0,46%), manganese (0,78%), the raised maintenance of silicon (0,55%), the carbon maintenance close to eutectoid to structure (0,79%) and microalloyed by vanadium in number of 0,07%.

Keywords: continuous cast steel billet, rails, microstructure, heat treatment, cooling rate, perlite, bainite, ferritic mesh, microalloying, vanadium, niobium, air environment, chemical composition, electron microscopy.

Введение

Исторически сложилось, что технология производства рельсов развивалась на основе сталей перлитного класса [1], поэтому в настоящее время подавляющее большинство изготавливаемых рельсов имеют микроструктуру перлита, различной степени дисперсности в зависимости от химического состава и способа термического упрочнения. Отдельные попытки производства и эксплуатации рельсов со структурой

бейнита показали положительные результаты, однако к настоящему моменту не получили широкого распространения [2–4].

Многочисленные исследования позволили выявить основные закономерности влияния микроструктуры на эксплуатационные свойства рельсов [5–10]. В работе Е.А. Шура сформулирован принцип однотипной структуры, заключающийся в том, что «...эксплуатационная стойкость рельсов непрерывно повышается с ростом твердости только у группы рельсов с однотипной структурой», при этом наибольшей конструктивной прочностью рельсов, по мнению автора, обладают рельсы либо при однородной структуре сорбита закалки максимальной дисперсности с твердостью 331–388 НВ, либо при однородной структуре отпущенного мартенсита или бейнита [5]. Следует отметить, что, по мнению авторов работ [11, 12], эксплуатационная стойкость рельсов напрямую связана с их твердостью, поэтому развитие рельсового производства должно идти по пути повышения содержания углерода и обеспечения твердости на поверхности катания рельсов на уровне порядка 400 НВ. Такие параметры микроструктуры рельсов, как величина межпластиночного расстояния в перлите, величина перлитных колоний, наличие избыточного феррита также оказывают большое влияние на свойства рельсов [5, 8].

В работе [8] на основании обработки результатов полигонных испытаний рельсов с различной эксплуатационной стойкостью сделан вывод, что наряду с более развитой дислокационной структурой большее влияние на стойкость к образованию контактно-усталостных дефектов оказывает отсутствие участков бейнитной микроструктуры и малое количество избыточного феррита.

В 2012–2013 гг. на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» была проведена коренная реконструкция рельсового производства, включающая замену технологии объемной закалки в масле с печного нагрева на дифференцированную закалку воздухом с использованием тепла прокатного нагрева [13–15]. Изменение технологии термической обработки потребовало разработки нового химического состава и параметров термической обработки, оптимизированных под закалочную среду с меньшей охлаждающей способностью.

В данной работе представлены результаты исследования микроструктуры образцов рельсовой стали четырех опытных химических составов, разработанных на базе стали марки Э76ХФ и охлажденных из

аустенитной области со скоростью 1–5 град/с, в процессе построения термокинетических диаграмм¹.

Материалы и методика исследования

Исследование проводили на образцах рельсового металла четырех опытных плавки стали марки Э76ХФ, две из которых дополнительно легировали ниобием. Выплавку стали производили в 100-тонной дуговой электросталеплавильной печи ДСП-100И7 и разливали на МНЛЗ. Химический состав опытного металла по результатам ковшевого анализа представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав опытного металла

| № п/п | Номер плавки | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Cu | Al | V | Nb | N |
|-------|--------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 1 | O54 | 0,75 | 0,83 | 0,55 | 0,012 | 0,008 | 0,42 | 0,08 | 0,14 | 0,003 | 0,04 | 0,060 | 0,013 |
| 2 | O51 | 0,79 | 1,09 | 0,43 | 0,016 | 0,009 | 0,57 | 0,07 | 0,13 | 0,003 | 0,04 | 0,035 | 0,015 |
| 3 | O76 | 0,79 | 0,78 | 0,55 | 0,014 | 0,015 | 0,46 | 0,08 | 0,14 | 0,002 | 0,07 | – | 0,011 |
| 4 | O74 | 0,76 | 0,87 | 0,32 | 0,017 | 0,005 | 0,56 | 0,07 | 0,12 | 0,003 | 0,07 | – | 0,015 |

Как видно из данных, представленных в табл. 1, в металле опытных плавки содержание углерода находится на уровне, близком к эвтектоидному – 0,75–0,79 %, сталь легирована хромом в количестве 0,42–0,57 %, марганцем в количестве 0,78–1,09 %, кремнием в количестве 0,32–0,55 %, ванадием в количестве 0,04–0,07 %. С целью оценки комплексного влияния ванадия и ниобия в стали с 0,04 % V дополнительно содержится 0,035–0,060 % ниобия. Содержание азота составляет 0,011–0,015 % и характерно для электростали.

По одной НЛЗ от каждой плавки прокатали на рельсы типа Р65 по действующей технологии. После прокатки от каждого рельса в нетермоупрочненном состоянии отобрали образцы для построения термокинетических диаграмм с использованием закалочно-деформацион-

¹ Работа по построению термокинетических диаграмм выполнена на базе НИТУ «МИСиС» при участии Р. Кавалла, И.С. Новожилова, М.Г. Хомутова, В.А. Трусова.

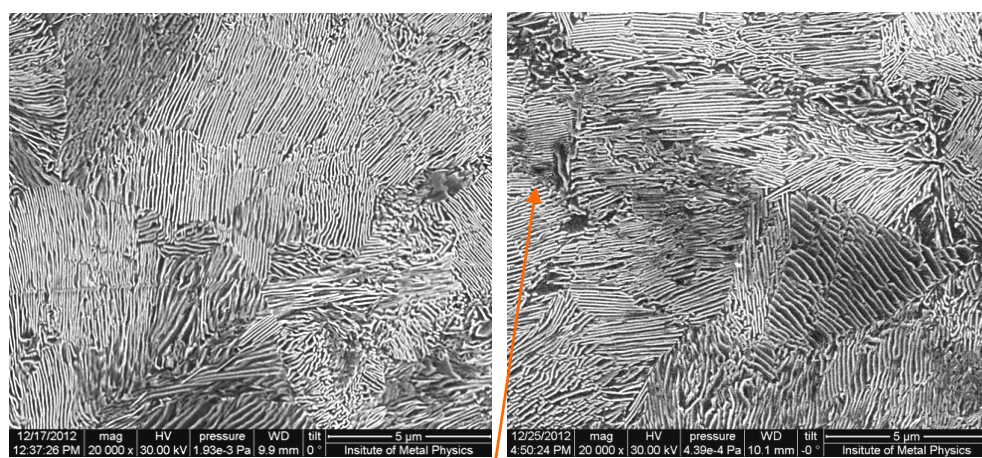
ного дилатометра ВАНР DIL 805 A/D. На дилатометре образцы, после нагрева со скоростью 10 град/с, деформировали по одно- и двухступенчатой схемам, имитирующим обжатие в черновой и чистовой клетях при прокатке и охлаждали от температуры ~ 950 °С со скоростью 1–20 град/с.

Шлифы для микроисследования готовили из дилатометрических образцов, охлажденных со скоростью 1, 3 и 5 град/с. Исследование микроструктуры проводили методом сканирующей микроскопии на приборе QUANTA-200 Philips при увеличении до 40 000 крат после химического травления шлифов в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты исследования микроструктуры образцов представлены в табл. 2 и на рис. 1–5.

Из представленных данных видно, что полностью перлитная структура сформировалась только в образцах плавки О76, охлажденных со скоростью 1 и 3 град/с, и в одном образце плавки О51, охлажденном со скоростью 1 град/с (см. рис. 1).



Ферритная сетка

a

б

Рис. 1. Микроструктура перлита в опытном металле: *a* – пл. О76, скорость охлаждения 3 град/с; *б* – пл. О51, скорость охлаждения 1 град/с

В образцах плавки О74, охлажденных со скоростью 1 и 3 град/с, и в образце плавки О54, охлажденном со скоростью 1 град/с (см. рис. 2), в структуре присутствует 1–3 % бейнита.

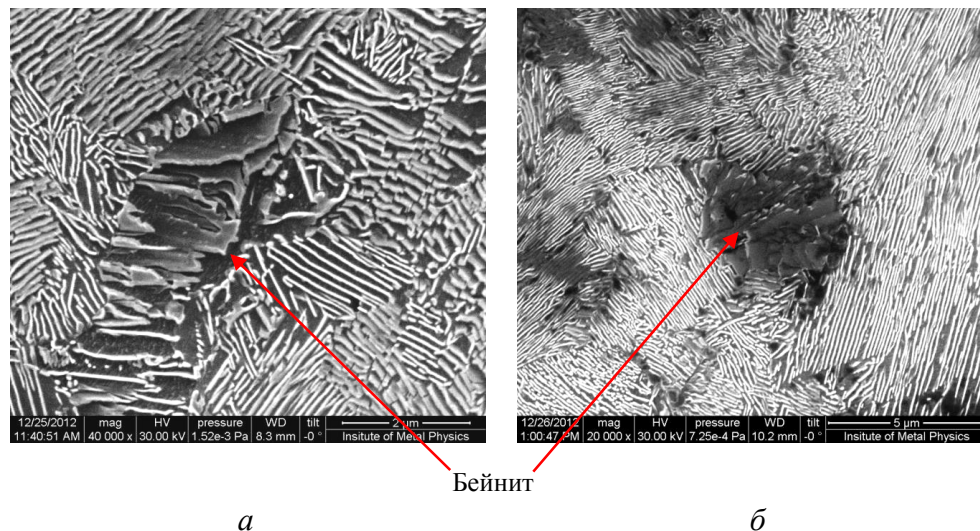


Рис. 2. Участки бейнита в микроструктуре опытного металла: *а* – пл. О74, скорость охлаждения 3 град/с; *б* – пл. О54, скорость охлаждения 1 град/с

Следует отметить, что при исследовании микроструктуры в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 с использованием оптического микроскопа определить 1–3 % бейнита невозможно, поэтому такая микроструктура будет оценена как удовлетворительная. Однако, согласно результатам работы [4], эксплуатационная стойкость металла с более однородной структурой (т.е. при отсутствии локальных участков бейнита) будет выше.

В образцах плавки О76 и О74 значительное количество бейнита и мартенсита образуется при скорости охлаждения 5 град/с (см. рис. 3).

В случае плавки О51 и О54 при охлаждении со скоростью 3 град/с около 50 % структуры – бейнит и мартенсит (рис. 4, *а*), а при охлаждении со скоростью 5 град/с игольчатые структуры являются основными (рис. 4, *б*).

Образование значительного количества бейнита и мартенсита в некоторой степени связано с высокой температурой начала охлаждения – 950 °С, что привело к значительной степени переохлаждения аустенита. Вероятно, при снижении температуры начала термообработки

до ~ 800–850 °С будут созданы более благоприятные условия для формирования перлита.

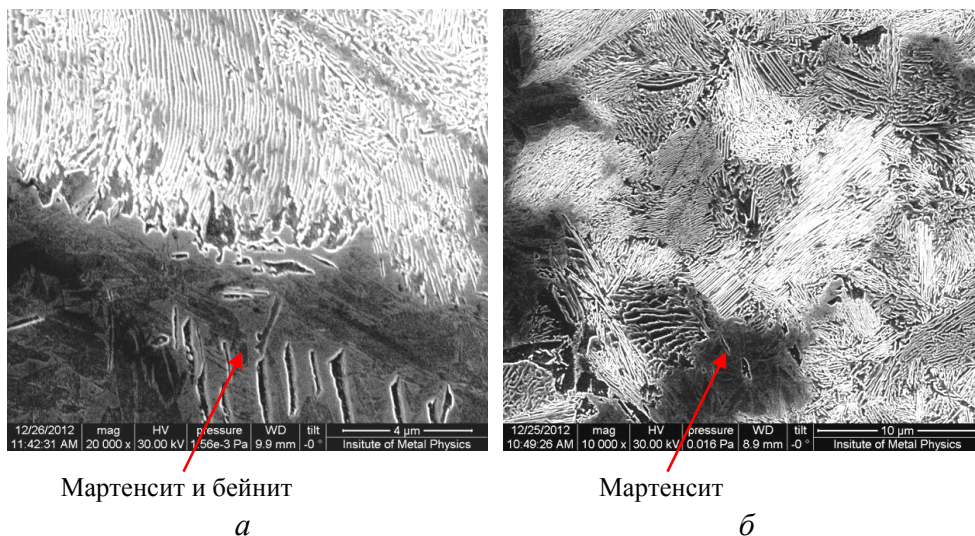


Рис. 3. Микроструктура опытного металла, охлажденного со скоростью 5 град/с: *а* – пл. О76; *б* – пл. О74

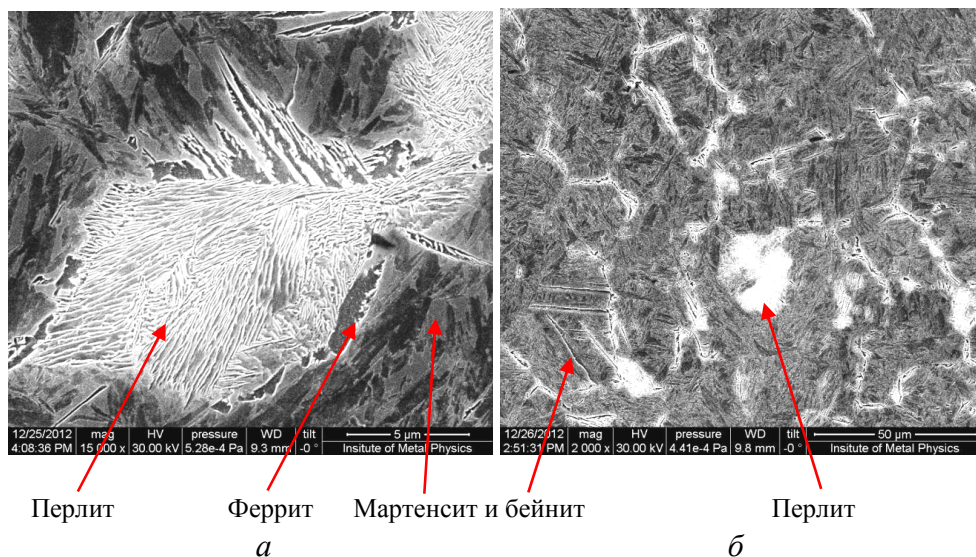


Рис. 4. Участки бейнита и мартенсита в микроструктуре опытного металла: *а* – пл. О51, скорость охлаждения 3 град/с; *б* – пл. О54, скорость охлаждения 5 град/с

Измерение параметров структуры (см. табл. 2) показало, что межпластиночное расстояние и величина колоний перлита изменяются в достаточно узких пределах. Средняя величина межпластиночного расстояния изменяется в пределах 0,09–0,13 мкм, что сопоставимо с параметрами структуры рядовых рельсов отечественного и зарубежного производства – 0,08–0,12 мкм [4]. С увеличением скорости охлаждения от 1 до 3 град/с и при формировании однородной перлитной структуры или до 50 % перлитной структуры отмечено уменьшение на 0,01–0,02 мкм среднего значения межпластиночного расстояния.

Таблица 2

Параметры микроструктуры дилатометрических образцов

| Номер плавки | Скорость охлаждения, град/с | Межпластиночное расстояние, мкм | Величина колоний перлита, мкм | Наличие бейнита, мартенсита | Наличие избыточного феррита |
|--------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| O76 | 1 | 0,11 (0,04–0,31) | 3 (0,5–13,8) | Нет | Зерна и редко тонкая сетка |
| | 3 | 0,10 (0,06–0,16) | 2 (0,3–9,5) | Нет | Тонкая сетка |
| | 5 | 0,09 (0,05–0,19) | 2 (0,1–10,5) | Мартенсит и бейнит (30 %) | Сетка |
| O74 | 1 | 0,12 (0,05–0,24) | 3 (0,2–19) | Бейнит (1–3 %) | Зерна и тонкая сетка |
| | 3 | 0,10 (0,06–0,24) | 2 (0,2–9,7) | Бейнит (1–3 %) | Тонкая сетка |
| | 5 | 0,10 (0,04–0,25) | 2 (0,2–11,9) | Мартенсит и бейнит (10 %) | Сетка |
| O51 | 1 | 0,10 (0,07–0,18) | 2 (0,2–12) | Нет | Сетка |
| | 3 | 0,09 (0,06–0,22) | 2 (0,14–8,6) | Мартенсит и бейнит (50–60 %) | Зерна и сетка |
| | 5 | 0,09 (0,07–0,11) | 1 (0,2–4,5) | Мартенсит и бейнит (95 %) | Зерна вокруг редких колоний перлита |

Окончание табл. 2

| Номер плавки | Скорость охлаждения, град/с | Межпластиночное расстояние, мкм | Величина колоний перлита, мкм | Наличие бейнита, мартенсита | Наличие избыточного феррита |
|--------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| О54 | 1 | 0,13 (0,09–0,21) | 3 (0,2–13,9) | Бейнит (1–3 %) | Тонкая сетка |
| | 3 | 0,10 (0,06–0,16) | 2 (0,2–10,7) | Мартенсит и бейнит (50 %) | Сетка |
| | 5 | 0,12 (0,04–0,33) | 2 (0,3–9,2) | Мартенсит и бейнит (95 %) | Сетка |

С увеличением скорости охлаждения уменьшаются максимальные размеры перлитных колоний.

Феррит в исследуемых образцах опытных сталей представлен в виде отдельных зерен (рис. 5, а) и/или в виде сетки по границам аустенитного зерна (рис. 5, б).

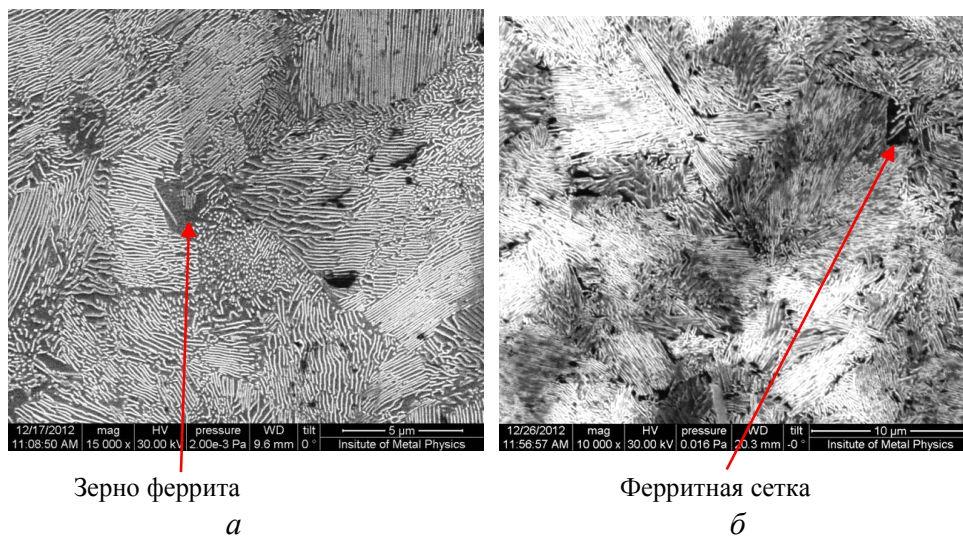


Рис. 5. Феррит в микроструктуре опытного металла: а – пл. О76, скорость охлаждения 1 град/с; б – пл. О54, скорость охлаждения 5 град/с

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Удовлетворительная микроструктура, состоящая из перлита и локальных участков бейнита в количестве 1–3 % (не разрешимых при исследовании на световом микроскопе), наблюдается в металле плавки:

– микролегированных ванадием в количестве 0,07 % и охлажденных со скоростью 1–3 град/с;

– комплексно легированных ванадием в количестве 0,04 % и ниобием в количестве 0,035–0,060 %, охлажденных со скоростью 1 град/с.

2. Полностью перлитная микроструктура, без бейнита и мартенсита, сформировалась при охлаждении металла пл. О76 со скоростью 1–3 град/с и пл. О51 при охлаждении со скоростью 1 град/с.

3. Средняя величина межпластиночного расстояния в исследуемом металле всех плавки изменяется в пределах 0,09–0,13 мкм, что сопоставимо с параметрами структуры рядовых рельсов отечественного и зарубежного производства – 0,08–0,12 мкм.

4. С увеличением скорости охлаждения от 1 до 3 град/с и при формировании однородной перлитной структуры или до 50 % перлитной структуры отмечено уменьшение на 0,01–0,02 мкм среднего значения межпластиночного расстояния.

5. С увеличением скорости охлаждения уменьшаются максимальные размеры перлитных колоний.

Таким образом, наиболее однородную микроструктуру в более широком диапазоне скоростей охлаждения (1–3 град/с) обеспечил металл плавки О76, экономнолегированный хромом, марганцем, кремнием, ванадием в количестве 0,46, 0,78, 0,55 и 0,07 % соответственно.

Список литературы

1. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов / В.В. Павлов, М.В. Темлянец, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.

2. Рельсы высокой прочности с бейнитной структурой, полученной с прокатного нагрева / Х. Де Боер, С.Р. Датта, Г.-Ю. Кайзер, С.О. Лудгрэн, Б. Мюзген, Г. Шмеддерс, К. Вик // Черные металлы. – 1995. – Июль. – С. 29–36.

3. Разработка технологии производства рельсов из бейнитной стали / В.И. Ворожищев, В.В. Павлов, Л.В. Корнева, Н.А. Козырев, Е.А. Шур // *Сталь*. – 2005. – № 2. – С. 71–74.

4. Железнодорожные рельсы из бейнитной стали / В.В. Павлов, Л.А. Годик, Л.В. Корнева, Н.А. Козырев, Е.П. Кузнецов // *Металлург*. – 2007. – № 4. – С. 51–53.

5. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов // *Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: сб. науч. тр. / ОАО «УИМ»*. – Екатеринбург, 2006. – С. 37–64.

6. Борц А.И., Заграничек К.Л., Долгих Л.В. Результаты сравнительных испытаний рельсов отечественных и зарубежных производителей на контактно-усталостную выносливость // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. тр. / ОАО «УИМ»*. – Екатеринбург, 2013. – С. 113–128.

7. Шур Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.

8. Добужская А.Б., Галицын Г.А., Сырейщикова В.И. Исследование структуры рельсов с разной стойкостью к образованию контактно-усталостных дефектов // *Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: сб. науч. тр. / ОАО «УИМ»*. – Екатеринбург, 2006. – С. 64–81.

9. Павлов В.В., Корнева Л.В., Полевой Е.В. Роль металлической матрицы в образовании контактно-усталостных дефектов в рельсах // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. тр. / ОАО «УИМ»*. – Екатеринбург, 2012. – С. 81–91.

10. Рейхарт В.А. Анализ дефектов рельсов // *Путь и путевое хозяйство*. – 2011. – № 4. – С. 22–25.

11. Уэда М., Ивано К., Ямамото Т. Характеристики термоупрочненных рельсов и новейшие разработки Nippon Steel // *Инженерные решения*. – 2012. – Январь. – С. 9–11.

12. Ивано Г., Кацун Я. Технические и эксплуатационные характеристики рельсов с высоким содержанием углерода // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. тр. / ОАО «УИМ»*. – Екатеринбург, 2012. – С. 72–81.

13. Разработка технологии производства дифференцированно термоупрочненных рельсов на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Е.В. Полевой, К.В. Волков, Е.П. Кузнецов, А.В. Головатенко, О.П. Атконова,

А.М. Юннусов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. / ОАО «УИМ». – Екатеринбург, 2014. – С. 93–101.

14. Головатенко А.В. Работа «ЕВРАЗ ЗСМК» по инновационному развитию рельсовой продукции за счет технического перевооружения и освоения новых технологий: сб. науч. докл. / ОАО «УИМ». – СПб., 2015. – С. 43–47.

15. Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» / Е.В. Полевой, К.В. Волков, А.В. Головатенко, О.П. Аткинова, А.М. Юннусов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – № 4. – С. 26–29.

References

1. Pavlov V.V., Temliantsev M.V., Korneva L.V., Siusiukin A.Iu. Perspektivnye tekhnologii teplovoi i termicheskoi obrabotki v proizvodstve rel'sov [Perspective technologies of thermal and heat treatment in production of rails]. Moscow: Teplotekhnika, 2007. 280 p.

2. De Boer Kh., Datta S.R., Kaizer G.-Iu., Ludgren S.O., Miuzgen B., Shmedders G., Vik K. Rel'sy vysokoi prochnosti s beinitnoi strukturoi, poluchennoi s prokatnogo nagreva [Rails of high durability with the beynitny structure received from rolling heating]. *Chernye metally*, 1995, July, pp. 29-36.

3. Vorozhishchev V.I., Pavlov V.V., Korneva L.V., Kozyrev N.A., Shur E.A. Razrabotka tekhnologii proizvodstva rel'sov iz beinitnoi stali [Development of the production technology of rails from beynitny steel]. *Stal'*, 2005, no. 2, pp. 71-74.

4. Pavlov V.V., Godik L.A., Korneva L.V., Kozyrev N.A., Kuznetsov E.P. Zheleznodorozhnye rel'sy iz beinitnoi stali [Railway rails from beynitny steel]. *Metallurg*, 2007, no. 4, pp. 51-53.

5. Shur E.A. Vliianie struktury na ekspluatatsionnuiu stoikost' rel'sov [Influence of structure on operational firmness of rails]. *Sbornik nauchnykh trudov "Vliianie svoistv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnuiu stoikost' rel'sov"*. Ekaterinburg: Ural'skii institut metallov, 2006, pp. 37-64.

6. Borts A.I., Zagranichnik K.L., Dolgikh L.V. Rezul'taty sravnitel'nykh ispytaniy rel'sov otechestvennykh i zarubezhnykh proizvoditelei na kontaktno-ustalostnuiu vynoslivost' [Results of comparative testing of rails of domestic and foreign manufacturers for contact and fatigue endurance].

ance]. *Sbornik nauchnykh trudov "Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii"*. Ekaterinburg: Ural'skii institut metallov, 2013, pp. 113-128.

7. Shur E.A. Povrezhdeniia rel'sov [Damages of rails]. Moscow: Intekst, 2012. 192 p.

8. Dobuzhskaia A.B., Galitsyn G.A., Syreishchikova V.I. Issledovanie struktury rel'sov s raznoi stoikost'iu k obrazovaniuu kontaktno-ustalostnykh defektov [Research of structure of rails with different resistance to formation of contact and fatigue defects]. *Sbornik nauchnykh trudov "Vliianie svoistv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnuiu stoikost' rel'sov"*. Ekaterinburg: Ural'skii institut metallov, 2006, pp. 64-81.

9. Pavlov V.V., Korneva L.V., Polevoi E.V. Rol' metallicheskoj matritsy v obrazovanii kontaktno-ustalostnykh defektov v rel'sakh [Role of a metal matrix in formation of contact and fatigue defects in rails]. *Sbornik nauchnykh trudov "Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii"*. Ekaterinburg: Ural'skii institut metallov, 2012, pp. 81-91.

10. Reikhart V.A. Analiz defektov rel'sov [Analysis of defects of rails]. *Put' i putevoe khoziaistvo*, 2011, no. 4, pp. 22-25.

11. Ueda M., Ivano K., Iamamoto T. Kharakteristiki termouprochnennykh rel'sov i noveishie razrabotki Nippon Steel [Characteristics of the thermostrengthened rails and the latest developments]. *Inzhenernye resheniia*, 2012, January, pp. 9-11.

12. Ivano G., Katsuia I. Tekhnicheskie i ekspluatatsionnye kharakteristiki rel'sov s vysokim sodержaniem ugleroda [Technical and operational characteristics of rails with the high content of carbon]. *Sbornik nauchnykh trudov "Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii"*. Ekaterinburg: Ural'skii institut metallov, 2012, pp. 72-81.

13. Polevoi E.V., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Golovatenko A.V., Atkonova O.P., Iunnusov A.M. Razrabotka tekhnologii proizvodstva differentsirovanno termouprochnennykh rel'sov na OAO «EVRAZ ZSMK» [Development of the production technology differentially the thermostrengthened rails on JSC «EVRAZ ZSMK»]. *Sbornik nauchnykh dokladov "Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii"*. Ekaterinburg: Ural'skii institut metallov, 2014, pp. 93-101.

14. Golovatenko A.V. Rabota «EVRAZ ZSMK» po innovatsionnomu razvitiuu rel'sovoi produktsii za schet tekhnicheskogo perevooruzheniia i osvoeniia novykh tekhnologii: sbornik nauchnykh dokladov [Work of

“EVRAZ ZSMK” on innovative development of rail products due to modernization and development of new technologies: collection of scientific reports]. Saint Petersburg: Ural'skii institut metallov, 2015, pp. 43-47.

15. Polevoi E.V., Volkov K.V., Golovatenko A.V., Atkonova O.P., Iunusov A.M. Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva rel'sov na OAO «EVRAZ Ob"edinennyi Zapadno-Sibirskii metallurgicheskii kombinat» [Enhancement of the production technology of rails on JSC “EVRAZ Joint West-Siberian Metallurgical Plant”]. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniia*, 2013, no. 4, pp. 26-29.

Получено 04.05.2016

Об авторах

Полевой Егор Владимирович (Новокузнецк, Россия) – начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела рельсового производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»; e-mail: Egor.Polevoj@evraz.com.

Добужская Алина Борисовна (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, заведующая лабораторией металловедения и термообработки ОАО «Уральский институт металлов»; e-mail: met@uim-stavan.ru.

Темлянец Михаил Викторович (Новокузнецк, Россия) – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и инновациям Сибирского государственного индустриального университета; e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru.

About the authors

Egor V. Polevoy (Novokuznetsk, Russian Federation) – Head of Bureau of Physical Metallurgy and Heat Treatment, Rail Production Technical Department, JSC “EVRAZ ZSMK”; e-mail: Egor.Polevoj@evraz.com.

Alina B. Dobuzhskaya (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Head of Laboratory of Metallography and Heat Treatment, JSC “Ural Institute of Metals”; e-mail: met@uim-stavan.ru.

Mikhail V. Temlyantsev (Novokuznetsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector on Scientific Work and Innovations, Siberian State Industrial University; e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru.