

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ*

Иванов Ю.Ф.^{1,2}, д.ф.-м.н, профессор, главный научный сотрудник

Громов В.Е.³, д.ф.-м.н, профессор, заведующий кафедрой физики

им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Перегудов О.А.¹, инженер

Морозов К.В.⁴, инженер

Юрьев А.Б.⁴, д.т.н., профессор, управляющий директор

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет «НИ ТПУ»

(634036, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30)

² Институт сильноточной электроники СО РАН

(634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3)

³ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

⁴ ОАО «ЕВРАЗ – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

(654043, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Методами современного физического материаловедения выявлены закономерности преобразования структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры поверхностного слоя (глубиной до 10 мм) рельсов в процессе длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1000 млн. т брутто). Построены профили микротвердости, выявлен факт снижения прочностных характеристик поверхности катания рельса после эксплуатации на железной дороге. Эксплуатация рельсов приводит к формированию многослойной структуры. Показано, что поверхностный слой толщиной примерно 20 мкм имеет многофазную субмикро- и нанокристаллическую структуру, содержит микропоры и микротрещины. Структура слоя, расположенного на расстоянии 2 мм от поверхности катания, по морфологическому признаку подобна структуре стали до эксплуатации и представлена зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии, зернами феррито-карбидной смеси и зернами структурно свободного феррита. Отмечена повышенная плотность изгибных экстинкционных контуров на глубине 2 мм от поверхности катания. Показано, что максимальная амплитуда полей напряжений формируется на межфазной границе глобулярная частица – матрица.

Ключевые слова: рельсы, эксплуатация, излом, структура, фазовый состав, микротвердость, поля напряжений, поверхность катания.

Увеличение грузонапряженности и интенсивности движения на современных магистралях приводят к раннему выходу рельсов из строя из-за контактно-усталостных повреждений. До 15 % всех рельсов, снимаемых в порядке одиночной замены, имеют недопустимые значения износа или смятия [1]. Помимо чисто практического интереса проблема повреждаемости рельсов является предметом самого пристального внимания ученых-металловедов и металлофизиков [2]. Уже при сравнительно небольшой (100 – 500 млн. т брутто) нагрузке в поверхностных слоях рельсов формируются структурно-фазовые состояния, кардинально отличающиеся от тех, которые образуются при обычной интенсивной пластической деформации [3 – 8]: пластины цементита либо изогнуты, либо разрушены, на межфаз-

ных границах отмечается крайне высокая плотность дислокаций, отмечается растворение цементита и образование аустенита. Явление деформационно-индуцированного распада цементита, очень стабильного в обычных условиях, свидетельствует о нарушении фазового равновесия и заставляет с пристальным вниманием относиться к поведению структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры при мегапластических деформациях [6 – 8].

Целью настоящей работы является анализ деформационного преобразования структуры рельсов, обусловленного длительной эксплуатацией на железной дороге.

В качестве материала исследования использовали образцы рельсов, свойства и элементный состав которых регламентируется ГОСТ Р 51685 – 2000. Образцы рельсовой стали были вырезаны из изделия в исходном состоянии и после эксплуатации на железной дороге (пропущенный тоннаж 1000 млн. т брутто). Анализу подвергали структурно-фазовое состояние поверхности и приповерхностного слоя зоны катания рельса по центральной оси. Структуру металла исследовали методами

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых кандидатов наук МК-4166.2015.2 и докторов наук МД-2920.2015.8, РФФИ в рамках научных проектов №№ 13-02-12009 офи_м, 15-08-03411, 14-08-00506а, госзаданий Минобрнауки № 2708 и 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы.

металлографии (метод поперечных травленных шлифов, травление осуществляли в 4 %-ом спиртовом растворе азотной кислоты), сканирующей (фрактография изломов) и просвечивающей электронной дифракционной (метод тонких фольг) микроскопии. Фольги готовили методом электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом непосредственно на поверхности катания, на расстояниях 2 и 10 мм от поверхности катания. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 2 Н.

Визуальный осмотр нетравленных шлифов выявил в образцах рельсовой стали после наработки 1000 млн. т брутто на поверхности катания сглаженную блестящую полосу наката, свидетельствующую об эксплуатации рельсов.

Распределение микротвердости металла рельсов после наработки 1000 млн. т брутто по сечению головки в поперечном направлении от поверхности катания представлено на рис. 1. Можно отметить двукратное снижение твердости в приповерхностном слое толщиной примерно 2 мм по отношению к слою стали, расположенному на расстоянии примерно 10 мм. Последнее указывает на деградацию структуры материала при эксплуатации.

Микроструктура стали после травления шлифов представляет сорбит закалки с обрывками ферритной сетки. По месту интенсивной пластической деформации с поверхности выявлены белые участки наклепанного металла толщиной не более 30 мкм. По мере удаления от поверхности дисперсность перлита незначительно уменьшается, а доля ферритной составляющей снижается. Величина действительного зерна стали не зависит от расстояния до поверхности катания и оценивается в соответствии с ГОСТ 5639 – 82 преимущественно номером 9 – 10.

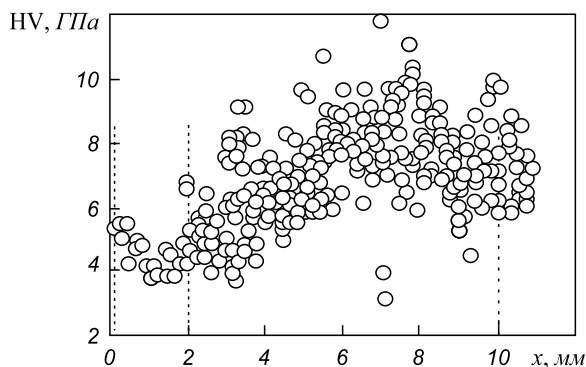


Рис. 1. Зависимость микротвердости HV от расстояния x от поверхности катания рельса (вертикальными штриховыми линиями указаны места расположения пластинок, использованных для исследования структуры методом просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг)

Fig. 1. Dependence of microhardness HV on the distance x from the rolling surface of rail (the vertical dashed lines indicate the plate location area, used for the structure research by the methods of transmission electron microscopy of fine foils)

Структуру поверхности разрушения стали анализировали на образцах рельсовой стали, разрушенных при ударном нагружении. Образцы для ударных испытаний были вырезаны из средней части головки рельсов таким образом, что верхняя плоскость образца (плоскость над концентратором напряжения) являлась поверхностью катания. На полученных таким образом изломах отчетливо выявляется поверхностный слой толщиной 200 – 300 мкм (рис. 2). При больших увеличениях этот слой разбивается на два подслоя: подслой, примыкающий к поверхности катания (поверхностный подслой) толщиной до 20 мкм, и переходный подслой.

Поверхностный подслой характеризуется наличием большого количества микротрещин, микропор и выбоин. Размеры микропор изменяются в пределах 1 – 2 мкм. Судя по рельефу излома, поверхностный подслой при ударном разрушении стали в свою очередь расслаивается на некоторое количество подслоев.

Структура переходного подслоя весьма неоднородна. На сколе выявляются фасетки излома, размеры которых могут достигать 10 мкм. Наряду с этим выявляются области, фасетки излома которых изменяются в пределах 0,2 – 1,0 мкм.

Преимущественный размер фасеток излома основного объема стали составляет 4 – 5 мкм. Однако выявляются участки, излом которых является гораздо более грубым (размер фасеток 10 мкм и более), а также области, размер фасеток которых менее микрометра.

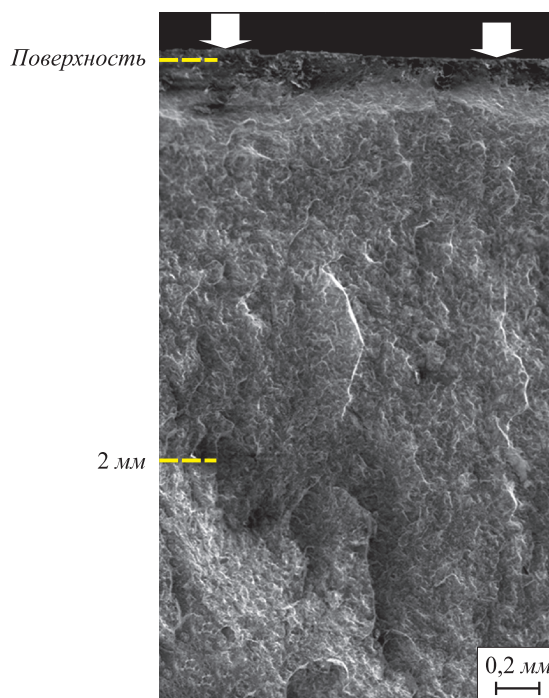


Рис. 2. Структура излома зоны катания рельса после эксплуатации (стрелками указана поверхность катания, штриховыми линиями обозначены места вырезки фольг)

Fig. 2. Failure pattern of the roll zone of the rail after the operation (the pointers indicate the roll surface, the dashed lines indicate the places of the foil cutting)

Следует отметить, что пограничный слой, отделяющий поверхностный слой от основного объема образца, в отдельных случаях содержит трещины, расположенные параллельно поверхности катания. Формирование излома приводит к отслаиванию поверхностного слоя от основного объема образца.

Таким образом, анализ поверхности ударного излома образцов стали, вырезанных параллельно поверхности катания, выявил формирование в процессе эксплуатации рельса поверхностного слоя, характеризующегося высоким уровнем дефектности. Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными при определении градиента микротвердости материала. Отмечено, что микротвердость поверхностного слоя значительно ниже микротвердости объема материала рельса.

Более детально морфологию структуры и фазового состава исследуемых рельсов анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Установлено, что структура рельсов перед эксплуатацией, как и в работе [9], представлена зернами перлита пластинчатой морфологии, зернами феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита разнообразной формы (зерна феррито-карбидной смеси) и зернами структурно свободного феррита, не содержащими в объеме частиц карбидной фазы. Основной структурной составляющей стали являются зерна пластинчатого перлита.

В зернах структурно свободного феррита наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций; в зернах перлита (а именно, в пластинах феррита) – сетчатая дислокационная субструктура.

После эксплуатации структура стали существенным образом изменяется в слое, примыкающем к поверхности катания. Во-первых, выявляется фрагментация пластин цементита перлитных колоний. Во-вторых, пластины цементита разрезаются на отдельные разориентированные частицы, на что указывает квазикольцевое расположение рефлексов цементита на микроэлектроннограммах, полученных с таких пластин (рис. 3, *а – в*). Размеры частиц изменяются в пределах 30 – 40 нм. В-третьих, выявляются частицы цементита в объеме зерен феррита и в объеме ферритных пластин перлитных колоний (рис. 3, *з – е*). Эти факты могут указывать на протекание при эксплуатации двух конкурирующих процессов: 1 – процесса разрезания частиц цементита с последующим выносом их в объем ферритных зерен или пластин (в структуре перлита); 2 – процесса разрезания, последующего растворения частиц цементита, перехода атомов углерода на дислокации (в атмосферы Коттрелла), перенос атомов углерода дислокациями в объем зерен (или пластин) феррита с последующим повторным формированием наноразмерных частиц цементита. Другие возможные механизмы пре-

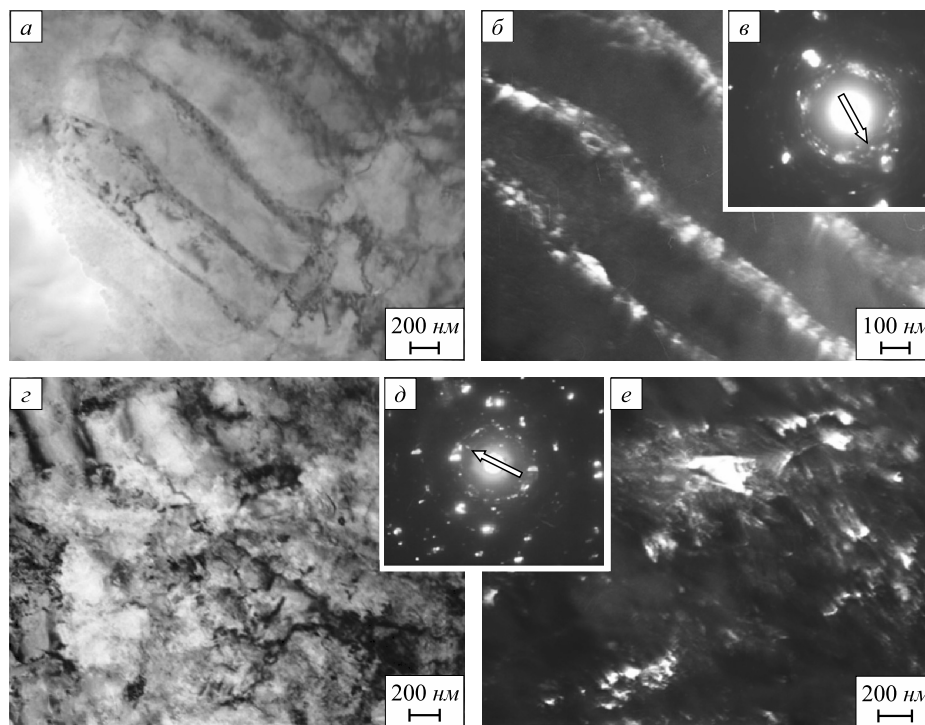


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя рельсовой стали, примыкающего к поверхности катания: *а, з* – светлое поле; *б* и *е* – темное поле, полученное в рефлексе $[031]\text{Fe}_3\text{C}$ и $[211]\text{Fe}_3\text{C}$; *в, д* – микроэлектроннограммы (стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля)

Fig. 3. Electron microscopic image of the layer structure of rail steel, adjoining the roll surface: *а, з* – bright field; *б* and *е* – dark field, received in the reflection $[031]\text{Fe}_3\text{C}$ and $[211]\text{Fe}_3\text{C}$; *в, д* – micro-electron-diffraction patterns (the pointers indicate reflections, in which dark fields are recieved)

образования карбидной подсистемы в рельсовой стали проанализированы в работах [3 – 8].

Структура слоя рельсовой стали, расположенного на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности катания после эксплуатации подобна структуре объема материала и структуре стали перед эксплуатацией. Основным морфологическим типом являются зерна пластинчатого перлита, в малом количестве присутствуют зерна структурно свободного феррита и зерна феррито-карбидной смеси. Отличительной особенностью материала слоя, расположенного на расстоянии 2 мм от поверхности катания, является большое количество изгибных экстинкционных контуров, что свидетельствует о наличии внутренних полей напряжений в данном слое стали (рис. 4). Мощность изгибного экстинкционного контура (внутренние поля напряжений, сгенерировавшие данный контур) характеризуется его поперечными размерами: чем меньше поперечные размеры контура, тем выше амплитуда внутренних полей напряжений [10 – 12]. Используя данную характеристику, можно отметить, что поля напряжений максимальной амплитуды формируются границей раздела частица – матрица (рис. 4, а).

Выводы. Построены профили микротвердости и выявлен факт снижения прочностных характеристик поверхности катания рельса после эксплуатации на железной дороге (пропущенный тоннаж 1000 млн. т брутто). Методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнены исследования фазового состава, дефектной субструктуры рельсов по центральной оси на глубину до 10 мм. Эксплуатация рельсов приводит к формированию многослойной структуры. Поверхностный слой толщиной до 20 мкм характеризуется наличием микропор и микротрещин, имеет многофазную нано- и субмикроструктурную структуру. Структура слоя, расположенного на расстоянии 2 мм от поверхности катания, по морфологическому признаку подобна структуре стали до эксплуатации и представлена зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии, зернами феррито-карбидной смеси и зернами структурно свободного феррита. Особенностью этого слоя является повышенная (по сравнению со структурой исходного состояния) плотность изгибных экстинкционных контуров, что указывает на формирование в процессе эксплуатации в слое внутренних полей напряжений. Источниками полей напряжений максимальной амплитуды являются границы раздела частица – матрица.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шур Е.А. Повреждение рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
2. Sheinman E. Wear of rails. A review of the American press // Journal of Friction and Wear. 2012. Vol. 33. № 4. P. 308 – 314.

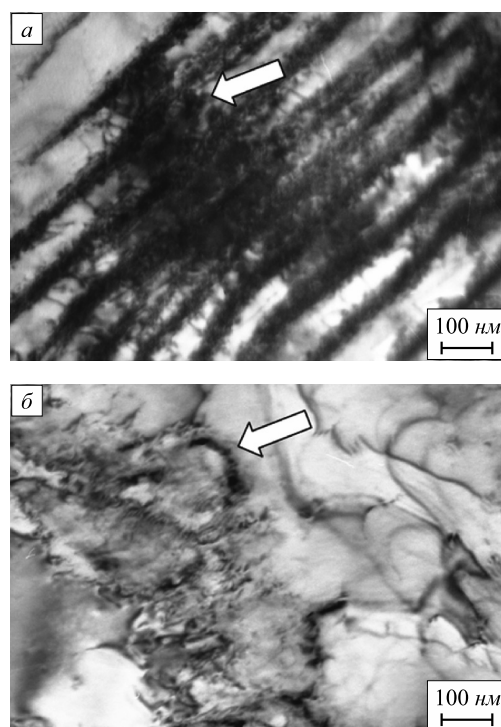


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение изгибных экстинкционных контуров (указаны стрелками) в слое, расположенном на глубине 2 мм

Fig. 4. Electron microscopic image of bend extinction contours (indicated with the pointers) in the layer, situated on the depth of 2 mm

3. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels // Steel tech. 2008. Vol. 3. № 1. P. 19 – 23.
4. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X. etc. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. P. 1659 – 1669.
5. Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L. etc. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // Mater. Sci. and Eng. A. 2013. Vol. 581. P. 81 – 89.
6. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // Mater. Sci. and Eng. A. 2003. Vol. 345. P. 81 – 89.
7. Li Y.J., Chai P., Bochers C. etc. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // Acta Mater. 2011. Vol. 59. P. 3965 – 3977.
8. Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // Scripta Mater. 2001. Vol. 45. P. 1469 – 1472.
9. Микроструктура закаленных рельсов / В.Е. Громов, А.Б. Юрьев, К.В. Морозов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014. – 213 с.
10. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
11. Конева Н.А., Козлов Э.В. Природа субструктурного упрочнения // Изв. вуз. Физика. 1982. № 8. С. 3 – 14.
12. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В.Е. Громов, Э.В. Козлов, В.И. Базайкин и др. – М.: Недра, 1997. – 293 с.

Поступила 5 марта 2015 г.

EVOLUTION OF RAIL STRUCTURE-PHASE STATES AT CONTINUOUS SERVICE

Ivanov Yu.F.^{1,2}, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Research associate

Gromov V.E.³, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics named after V.M. Finkel'

(gromov@physics.sibsiu.ru)

Peregudov O.A.¹, Engineer

Morozov K.V.⁴, Engineer

Yur'ev A.B.⁴, Dr. Sci. (Tech.), Managing Director, Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel'

¹ National Research Tomsk Polytechnic University (30, Lenina ave., Tomsk, 634036, Russia)

² Institute of High Current Electronics SB RAS (2/3, Akademicheskii ave., Tomsk, 634055, Russia)

³ Siberian State Industrial University (42, Kirova str. Kemerovo region, Novokuznetsk, 654007, Russia)

⁴ JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant" (16, Kosmicheskoe route, Kemerovo region, Novokuznetsk, 654043, Russia)

Abstract. The regularities of structure-phase states and defect substructure transformations of the rail surface layer with the 10 mm depth under continuous service (the passed tonnage of 1000 million ton of gross weight) have been revealed by the methods of modern physical material science. The microhardness profiles have been constructed and the reduction of the strength characteristics of the rolling surface after the rail operation on the railroad has been revealed. Operation of the rails leads to the formation of the multilayer structure. It has been shown that the surface layer with the ~20 μm depth has a multiphase submicro- and nanocrystal structure and contains micropores and microcracks. The layer structure located at a distance of 2 mm from the rolling surface is morphologically similar to that of the steel before the operation and it is presented predominantly by perlite grains of lamellar morphology, grains of ferrite-carbide mixture and structurally free ferrite grains. The increased density of bend extinction contours at the depth of 2 mm from the rolling surface have been noted and it has been shown that maximum amplitude of stress fields is formed at the interphase globular particle-matrix density.

Keywords: rails, operation, fracture, structure, phase composition, microhardness, stress fields, rolling surface.

REFERENCES

1. Shur E.A. *Povrezhdenie rel'sov* [Rail damage]. Moscow: Intekst, 2012. 192 p. (In Russ.).
2. Sheinman E. Wear of rails. A review of the American press. *Journal of Friction and Wear*. 2012, Vol. 33, no. 4, pp. 308–314.
3. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels. *Steel tech.* 2008, Vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
4. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite. *Acta Mater.* 2006, Vol. 54, pp. 1659–1669.
5. Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kubel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion. *Mater. Sci. and Eng. A*. 2013, Vol. 581, pp. 81–89.
6. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation. *Mater. Sci. and Eng. A*. 2003, Vol. 345, pp. 81–89.
7. Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite. *Acta Mater.* 2011, Vol. 59, pp. 3965–3977.
8. Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. *Scripta Mater.* 2001, Vol. 45, pp. 1469–1472.
9. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. *Mikrostruktura zakalennykh rel'sov* [Microstructure of hardened rails]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2014. 213 p. (In Russ.).
10. Hirsh P., Hovi R., Nicholson R., Pashley D.W., Whelan M.J. The Electron Microscopy of Thin Crystals. Butterworths, 1965. 549 p. (Russ. ed.: Hirsh P., Hovi R., Nicholson R. etc. *Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov*. Moscow: Mir, 1968. 574 p.).
11. Koneva N.A., Kozlov E.V. Nature of substructural hardening. *Soviet Physics Journal*. 1982, Vol. 25, no. 8, pp. 681–691.
12. Gromov V.E., Kozlov E.V., Bazaikin V.I., Tsellernaer V.Ya., Ivanov Yu.F., Ignatenko L.N., Popova N.V., Chinokalov V.Ya., Poltoratskii L.M., Zakirov D.M. *Fizika i mekhanika volocheniya i ob'emnoi shtampovki* [Physics and mechanics of drawing and die forging]. Moscow: Nedra, 1997. 293 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The investigation was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists PhDs MK-4166.2015.2 and doctors MD-2920.2015.8, RFBR under research projects ofi_m no. 13-02-12009, 15-08-03411, 14-08-00506a, State task of the Ministry of Education no. 2708 and 3.1496.2014 / K for the execution of research work.

Received March 5, 2015