

УДК 669.14.018.294:539.2

## «БЕЛЫЕ» СЛОИ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ\*

**В.Е. Кормышев<sup>1</sup>, Е.Ю. Жаворонкова<sup>1</sup>, Ю.А. Рубанникова<sup>1</sup>, В.Е. Громов<sup>1</sup>, А.А. Юрьев<sup>2</sup>**

**E-mail: 89236230000@mail.ru**

**<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия**

**<sup>2</sup>АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»,  
Новокузнецк, Россия**

**Аннотация.** Проанализированы литературные данные по формированию «белых» слоев на поверхности рельсов при длительной эксплуатации. Отмечено, что основными механизмами формирования этих слоев является образование мартенсита и наноразмерного феррита. Выявлены преимущества и недостатки современных методов структурных исследований «белых» слоев: просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), дифракции обратно-рассеянных электронов, кристаллографического ориентационного картирования в ПЭМ, дифракции Кикучи. При анализе моделей формирования слоев при интенсивной пластической деформации отмечено, что хорошее соответствие с данными экспериментов обеспечивает модель неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

**Ключевые слова:** «белый» слой, рельсы, механизм формирования, мартенсит, перлит.

## “WHITE” LAYERS ON THE RAIL SURFACE

**V.E. Kormyshev<sup>1</sup>, E.Yu. Zhavoronkova<sup>1</sup>, Yu.A. Rubannikova<sup>1</sup>, V.E. Gromov<sup>1</sup>, A.A. Yuryev<sup>2</sup>**

**E-mail: 89236230000@mail.ru**

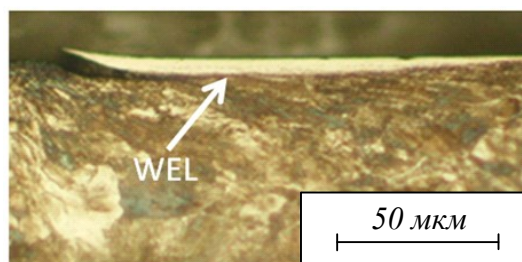
**<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia**

**<sup>2</sup>EVRAZ Consolidated West Siberian Metallurgical Plant JSC, Novokuznetsk, Russia**

**Abstract.** The data on formation of “white” layers on the surface of rails during long-term operation taken from scientific literature are analyzed. It is noted that the main mechanisms of formation of these layers is martensite and nanosized ferrite generation. Advantages and disadvantages of modern methods of structural studies of “white” layers by transmission electron microscopy (TEM), electron backscatter diffraction, crystallographic orientation mapping in TEM, Kikuchi diffraction are revealed. Analyzing models of layer formation during intense plastic deformation, it was noted that good conformity with experimental data is provided by Kelvin-Helmholtz instability model.

**Keywords:** “white” layer, rails, formation mechanism, martensite, perlite.

В рельсах при современных скоростях движения железнодорожных составов и высоких (примерно 1 ГПа) контактных давлениях уже при сравнительно небольшом (100 – 500 млн. т брутто) пропущенном тоннаже в поверхностных слоях наблюдается измельчение микроструктуры до наноразмерного диапазона и даже формирование «белых» слоев, приводящее к усталостным повреждениям [1 – 8] (см. рисунок).



«Белый» слой на поверхности рельса после эксплуатации  
(WEL – White Etching Layer)

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-32-60001.

При длительной эксплуатации первоначальная перлитная микроструктура трансформируется на поверхности рельсов в различные структуры. Обычно новые структуры появляются на глубине до 20 мкм в виде «белого» слоя, обнаруживаемого при травлении в спиртовом растворе азотной кислоты. Образование «белого» слоя – это общая проблема в рельсах с перлитной микроструктурой, поскольку этот слой встречается в различных исходных микроструктурных компонентах, например в феррито-перлитной [8] или полностью пластинчатой перлитной структуре [1, 5, 6]; на различных участках пути (тангенциальные и искривленные участки).

Присутствие «белого» слоя может приводить к зарождению трещин после его хрупкого разрушения из-за высокой (до 1200 HV) твердости [5]. Зарождение трещин наблюдается повсеместно при металлографическом изучении нагруженных рельсов в Японии [9], в Нидерландах [10], в Австралии [11], в Великобритании [12] и других странах. Японские исследователи [9] считают, что предотвращение инициирования и развития контактных усталостных трещин возможно при оптимальном износе. В работах голландских, английских и австралийских ученых [10 – 12] выявлена 3D анизотропная текстура поверхностного слоя, прослежена роль морфологии трещины при ее врастании в рельс. Показано, что морфология трещины зависит от пластической деформации перлита под «белым» слоем.

В работах [13, 14] по данным лабораторных испытаний выявлено влияние «белого» слоя на контактную усталость в рельсах, показано, что «белый» слой облегчает процессы износа и развития контактной усталости. Числовой концентрационный анализ напряженно-деформированного состояния в «белом» слое показал хорошее соответствие с экспериментальными результатами.

Структурные исследования «белого» слоя обычно проводятся взаимодополняющими методами современного физического материаловедения. Определение тетрагональности по сравнению с объемно-центрированной кубической решеткой, а также содержание остаточного аустенита методами рентгеновского анализа является прямым доказательством наличия мартенсита в «белом» слое [3 – 15]. Дополнительным доказательством является субструктура двойникового мартенсита, выявляемая методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [3]. В работе [6] методом ПЭМ установлено, что «белый» слой имеет высокую плотность дислокаций и состоит из зерен с размерами несколько сотен нанометров, что значительно меньше размеров перлитных зерен «белого» слоя. Исследования методом ПЭМ были допол-

нены анализом результатов атомно-силовой микроскопии для оценки диффузии марганца в «белом» слое, сделан вывод, что температура на поверхности рельсов может достигать 900 °С. В соответствии с предыдущим был сделан вывод об образовании «белого» слоя через мартенситное фазовое превращение. Другая гипотеза образования «белого» слоя состоит в том, что формирование нанокристаллических ферритных зерен происходит благодаря деформации, запятой при прохождении колес по поверхности.

Первоначальная феррито-перлитная структура подвергается существенному измельчению до размеров зерен в десятки нанометров, при этом цементит растворяется в этой структуре благодаря пластической деформации. Аномально высокая твердость [7, 16] не может быть получена путем стандартных термических обработок, но может быть обусловлена упрочнением ультрамелкой зеренной структуры феррита. В ряде случаев образование «белого» слоя объясняется этой гипотезой, несмотря на то, что наблюдаются характеристики, подобные характеристикам мартенсита. Например, в работе [2] на основании ПЭМ исследований установлена мартенситная микроструктура «белого» слоя без остаточного аустенита. Соответствующая вычисленная температура существенно отличается от температуры, необходимой для превращения перлита в аустенит; это дает основание связывать образование «белого» слоя с повторной деформацией.

Образование «белого» слоя в соответствии с вышеупомянутой гипотезой хорошо подтверждается лабораторными исследованиями. Например, сверхбыстрая термическая обработка может обеспечивать образование мартенсита с твердостью и размером зерен, наблюдаемых в «белых» слоях рельсов [17] или мартенсита с высокой твердостью и двойниковой субструктурой [3]. Подобный «белый» слой также обычно наблюдается в поверхностных слоях нагруженных элементов, подверженных значительному повышению температуры, например при механообработке (сверлении, фрезеровании и т.д.) [18 – 20]. Нанокристаллические «белые» ферритные слои образуются в перлите, подвергнутом интенсивной пластической деформации [7, 20]. Экстремально высокая твердость «белого» слоя с наноразмерными зернами [7] может быть получена при интенсивной пластической деформации. Для образования наноразмерных зерен и полного растворения цементита необходима некоторая критическая степень деформации. Следовательно, микроструктура «белого» слоя должна быть связана с условиями нагружения рельсов.

При рассмотрении контакта колеса – рельс необходимо принимать во внимание следующее:

«белый» слой образуется при комбинированном действии пластической деформации и повышения температуры; эти вклады зависят от истории эксплуатации рельсов. Однако высокоинформативные методы автоматического ориентационного картирования (дифракция обратно отраженных электронов) (EBSD) и недавно разработанное автоматическое кристаллографическое ориентационное картирование в ПЭМ (ACOM-TEM) с улучшенным разрешением [21, 22] использованы лишь в нескольких вышеупомянутых исследованиях. Методы EBSD и ACOM-TEM обеспечивают точное измерение ориентации и разориентации, вследствие чего являются исключительно полезными при анализе деформационных структур «белого» слоя [17] и градиентов деформации в рельсах [23, 24]. Описание и количественная оценка таких структур только методами ПЭМ и атомно-силовой микроскопии весьма затруднительны. Более того, EBSD может сканировать большой объем образца, включая «белый» слой и окружающую матрицу. По сравнению с ПЭМ и атомно-силовой микроскопией метод EBSD обеспечивает установление более широких отличий в параметрах (например, размер зерна) «белого» слоя и перлитной основы. Пространственное разрешение EBSD составляет 50 – 100 нм, что является ограничением в идентификации наноразмерной структуры в «белом» слое [24].

Наноразмерная (<50 нм) структура зерен была определена методом дифракции Кикучи на просвет в «белом» слое, образованном при интенсивной пластической деформации высокоуглеродистой стали (1 % С (по массе)) с первоначальной мартенситной структурой и 30 – 40 % остаточного аустенита [25]. Дополнительная информация может быть получена методом ACOM-TEM с пространственным разрешением 2 нм. Именно поэтому совместное использование методов EBSD и ACOM-TEM, несомненно, полезно для описания «белого» слоя, причем дополнительная информация может быть получена из кристаллографических особенностей слоя.

Сложность и неоднозначность процессов формирования «белого» слоя вызывают необходимость использования модельных представлений [26]. Среди множества подходов к этой проблеме (физическая мезомеханика [27], градиентная теория упругости [28, 29], теория упругости неоднородных сред [30, 31]) заслуживает внимание гипотеза образования наноструктур при мегапластической деформации благодаря течению материала в результате гидродинамических неустойчивостей.

В исследованиях [32 – 34] разработана математическая модель формирования наноструктур в материалах при интенсивной пластической

деформации. Модель основана на предположении о том, что при больших пластических деформациях материал ведет себя как вязкая жидкость. Суть механизма образования наноструктурных состояний при мегапластической деформации и длительной эксплуатации рельсов заключается в том, что в деформируемом материале появляются поверхности тангенциального разрыва скорости. На этих поверхностях возникает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Анализ зависимости декремента возмущений от волнового числа показал, что эта неустойчивость проявляется как в наноразмерном, так и в микро-размерном диапазоне длин волн. На примере рельсовой стали после длительной эксплуатации показано, что критическая длина волны имеет значения от 11 до 40 нм, что соответствует наблюдаемым размерам структурных элементов.

### **Выводы**

Анализ последних публикаций по проблеме формирования и исследования «белых» слоев на поверхности рельсов свидетельствует об актуальности, фундаментальности и практической значимости изучения этих вопросов.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Bernsteiner C., Muller G., Meierhofer A. et al. Development of white etching layers on rails: Simulation and experiments // *Wear*. 2016. Vol. 366-367. P. 116 – 122.
2. Wu J., Petrov R.H., Kolling S. et al. Micro and nanoscale characterization of complex multi-layer-structured white etching in rails // *Metals*. 2018. Vol. 8. P. 749 – 768.
3. Österle R.H., Pyzalla A., Wang L.W. et al. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction // *Mater. Sci. Eng. A*. 2001. No. 303. P. 150 – 157.
4. Wild W.L., Hasse B., Wroblewski T. et al. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation // *Wear*. 2003. No. 254. P. 876 – 883.
5. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S. et al. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail // *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. No. 421. P. 191 – 199.
6. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface // *Acta Mater*. 2010. No. 58. P. 3602 – 3612.
7. Lojowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G. et al. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // *Mater. Sci. Eng. A*. 2001. No. 303. P. 197 – 208.

8. Newcomb S.B., Stobbs W.M. A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a rail head // *Mater. Sci. Eng.* 1984. No. 66. P. 195 – 204.
9. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // *Electron. J. Struct. Eng.* 2013. No. 13. P. 67 – 74.
10. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails – Part I: Origination // *Int. J. Fatigue*. 2013. No. 47. P. 361 – 372.
11. Pal S., Valente C., Daniel W. et al. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation // *Wear*. 2012. No. 284-285. P. 30 – 42.
12. Clayton P. Tribological aspects of wheel-rail contact: A review of recent experimental research // *Wear*. 1995. No. 191. P. 170 – 183.
13. Carroll R.I., Beynon J.H. Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 1. Crack morphology // *Wear*. 2007. No. 262. P. 1253 – 1266.
14. Carroll R.I., Beynon J.H. Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 2. Numerical results // *Wear*. 2007. No. 262. P. 1267 – 1273.
15. Wang L., Pyzalla A., Stadlbauer W. et al. Microstructure features on rolling surfaces of railway rails subjected to heavy loading // *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. No. 359. P. 31 – 43.
16. Lojkowski W., Millman Y., Chugunova S.I. et al. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks // *Mater. Sci. Eng. A*. 2001. No. 303. P. 209 – 215.
17. Wu J., Petrov R.H., Naeimi M. et al. Laboratory simulation of martensite formation of white etching layer in rail steel // *Int. J. Fatigue*. 2016. No. 91. P. 11 – 20.
18. Griffiths B.J. White layer formations at machined surfaces and their relationship to white layer Formations at worn surfaces // *J. Tribol.* 1985. No. 107. P. 165.
19. Umbrello D., Rotella G. Experimental analysis of mechanisms related to white layer formation during hard turning of AISI 52100 bearing steel // *Mater. Sci. Technol.* 2012. No. 28. P. 205 – 212.
20. Todaka Y., Umemoto M., Tsuchiya K. Nanocrystallization in carbon steels by various severe plastic deformation processes // *Materials Science Forum*. No. 503-504. P. 11 – 18.
21. Rauch E.F., Véron M. Automated crystal orientation and phase mapping in TEM // *Mater. Charact.* 2014. No. 98. P. 1 – 9.
22. Kobler A., Kashiwar A., Hahn H. et al. Combination of in situ straining and ACOM TEM: A novel method for analysis of plastic deformation of nanocrystalline metals // *Ultramicroscopy*. 2013. No. 128. P. 68 – 81.
23. Linz M., Cihak-Bayr U., Trausmuth A. et al. EBSD study of early-damaging phenomena in wheel – rail model test // *Wear*. 2015. No. 342-343. P. 13 – 21.
24. Wu J., Petrov R.H., Naeimi M. et al. A microstructural study of rolling contact fatigue in rails. – Civil-Comp Press: Stirling, 2014. P. 118.
25. Hossain R., Pahlevani F., Witteveen E. et al. Vol.4 Hybrid structure of white layer in high carbon steel–Formation mechanism and its properties // *Sci. Rep.* 2017. No. 7. P. 1 – 12.
26. Дифференцированно закаленные рельсы: Эволюция структуры и свойств в процессе эксплуатации / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Юрьев А.А. и др. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. – 197 с.
27. Moiseenko D.D., Panin V.E. Physical fracture mesomechanics of solids treated as nonlinear hierarchically organized systems // *Mechanics of Solids*. 2015. Vol. 50. No. 4. P. 400 – 411.
28. Samuel Forest, Elias C. Aifantis. Some links between recent gradient thermo-elasto-plasticity theories and the thermomechanics of generalized continua // *International Journal of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47. P. 3367 – 3376.
29. Zhang N.H., Meng W.L., Aifantis E.C. Elastic bending analysis of bilayered beams containing a gradient layer by an alternative two-variable method // *Composite Structures*. 2011. Vol. 93. P. 3130 – 3139.
30. Александров В.М., Пожарский Д.А. Неклассические пространственные задачи механики контактных взаимодействий упругих тел. – М.: Факториал, 1998. – 288 с.
31. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. – М.: Физматлит, 2004. – 302 с.
32. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Sarycheva E.V. et al. Viscous flow analysis of the Kelvin-Helmholtz instability for short waves // *AIP Conference Proceedings*. 2016. No. 1783. P. 020198-1 – 020198-4.
33. Сарычев В.Д., Невский С.А., Громов В.Е. Модель образования наноструктур в рельсовой стали при интенсивной пластической деформации // *Деформация и разрушение материалов*. 2016. № 6. С. 25 – 29.
34. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu. et al. Viscous flow analysis of the Kelvin-Helmholtz instability for short waves // *AIP Conference Proceedings*. 2015. No. 1683. P. 020200-1 – 020200-4.

© 2020 г. В.Е. Кормышев, Е.Ю. Жаворонкова,  
Ю.А. Рубанникова, В.Е. Громов, А.А. Юрьев  
Поступила 3 декабря 2019 г.