

## Металлографическая экспертиза как обратная связь между качеством и производством продукции

© 2022

*Мерсон Дмитрий Львович*\*<sup>1</sup>, доктор физико-математических наук, профессор,  
директор НИИ прогрессивных технологий

*Караванова Анастасия Анатольевна*<sup>2</sup>, кандидат технических наук,  
заместитель директора НИИ прогрессивных технологий

*Климанов Алексей Владимирович*<sup>3</sup>, магистрант  
кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

\*E-mail: [d.merson@tltu.ru](mailto:d.merson@tltu.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-4115>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9192-525X>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3313-2398>

Поступила в редакцию 20.02.2022

Принята к публикации 21.05.2022

**Аннотация:** Несмотря на все большую автоматизацию процесса проектирования и производства металлических изделий, выход последних из строя остается достаточно распространенным явлением. Для выяснения причин подобных инцидентов назначают металлографическую экспертизу, проводить которую на должном уровне могут только специализированные аккредитованные организации. Металлографическая экспертиза – это инструмент, выполняющий роль обратной связи между качеством изделий на выходе и всей цепочкой многочисленных операций на пути их создания. Цель настоящей работы состоит в демонстрации на практическом примере возможности и особой значимости выводов металлографической экспертизы для отработки технологии изготовления изделий. На поверхность оси колесной пары локомотива для повышения ее износостойкости методом высокоскоростного плазменного напыления было нанесено покрытие NiCrBSi. Во время проведения ресурсных стендовых испытаний оси в ней была обнаружена магистральная усталостная трещина, испытания остановлены, а ось искусственно доломана. Проведенный анализ качества металла (химического состава, механических свойств (прочностных, пластических, ударной вязкости), микроструктуры, чистоты металла по неметаллическим включениям и параметров поверхностного слоя, упрочненного накатыванием роликом) показал его полное соответствие нормативной документации. Параметры покрытия NiCrBSi по толщине и твердости также соответствовали заявленным в технологии значениям. Согласно фрактографическому анализу излома зарождение усталостного разрушения происходило по многоочаговому механизму, что является характерным признаком наличия общей объективной причины недостаточной прочности изделия, не связанной с каким-либо случайным фактором. В результате проведенной металлографической экспертизы установлено, что основной причиной разрушения оси колесной пары является недостаточная усталостная прочность покрытия. Зародившиеся в нем многочисленные усталостные микротрещины проросли в основной металл и привели к образованию усталостных макротрещин на разных уровнях, слияние которых привело к формированию обширной многоочаговой поверхности усталостного разрушения.

**Ключевые слова:** металлографическая экспертиза; испытания; высокоскоростное плазменное напыление; структура; усталостные трещины.

**Для цитирования:** Мерсон Д.Л., Караванова А.А., Климанов А.В. Металлографическая экспертиза как обратная связь между качеством и производством продукции // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. С. 54–62. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-54-62.

### ВВЕДЕНИЕ

Производство каждого изделия, конструкции или детали является результатом длинной цепочки разнообразных действий, начиная от проектирования и заканчивая сборкой. С каждым годом в реализации этого процесса все больше места отводится различным автоматизированным программам, позволяющим не только проектировать изделия с учетом обеспечения прочности, но и полностью разрабатывать технологии их изготовления [1–3]. Тем не менее случаи выхода из строя изделий или даже возникновения аварийных ситуаций происходят достаточно часто [4–6]. Как правило, для установления объективных причин наступления таких инцидентов назначают проведение металлографической

экспертизы (МЭ). Инициатором проведения МЭ может быть производитель продукции, потребитель, а также прокуратура или следственные органы.

Число возможных причин выхода изделий из строя очень велико, они могут возникнуть на любом этапе жизни изделия, которую условно можно представить следующей последовательностью: проектирование → изготовление → сборка → эксплуатация. Перечень вероятных на каждом из указанных этапов причин «несчастий» можно дополнительно разбить на группы. Например, на этапе изготовления это могут быть некачественный исходный материал, нарушения технологий механической и термической обработок, нанесения покрытий и др. [7–9]. В связи с указанной многофакторностью и высокой ответственностью за результат метало-

графическую экспертизу в большинстве случаев поручают проводить специализированным аккредитованным организациям, имеющим в своем распоряжении квалифицированных аттестованных специалистов, поверенное испытательное и современное исследовательское оборудование, а также нормативную документацию (методики), регламентирующую процедуры проведения испытаний и исследований.

При проведении МЭ необходимо соблюдать определенные правила и учитывать любые мелочи. Прежде чем начинать какие бы то ни было манипуляции с объектами экспертизы, необходимо изучить документы, набор которых может сильно различаться в зависимости от ситуации, но обычно включает паспорт на изделие, требования чертежей к деталям и описание технологии их изготовления, условия эксплуатации, акт первичного расследования аварии (при наличии) и другие документы [10;11].

Особое место занимает пробоподготовка материалов объекта экспертизы: вырезка контрольных образцов должна, во-первых, проводиться в местах, наиболее объективно отражающих общее состояние материала; во-вторых, важно не повредить материал в местах с признаками деградации (дефекты, микротрещины, следы коррозии и т. п.), изучение которых представляет максимальный интерес. Кроме того, вырезку образцов следует проводить с применением средств охлаждения для недопущения структурных изменений в процессе механической обработки.

Металлографическую экспертизу (исследования) проводят не только при расследовании причин разрушения или аварий, но и для выявления причин брака на производстве. Нередка ситуация, что при соблюдении одной и той же технологии изготовления детали при поступлении на вход новой партии металла на выходе идет брак. Если при этом качество нового металла полностью соответствует нормативной документации (НД), то разобраться, в чем проблема, – одна из самых трудных задач, ставящихся перед МЭ. В этом случае требуется детально разбираться в мельчайших отличиях микро- и макроструктуры, химическом составе и других свойствах металла из различных партий, и по итогам анализа производитель должен ужесточить требования к металлу сверх общепринятой НД.

Цель работы – на практическом примере продемонстрировать возможности и особую значимость выводов металлографической экспертизы для отработки технологии изготовления изделий.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Металлографическая экспертиза, о которой пойдет речь, была проведена в испытательных лабораториях НИИ прогрессивных технологий (НИИПТ) Тольяттинского государственного университета. НИИПТ имеет более 15 лет опыта работы в качестве экспертной организации. В настоящее время он аккредитован в Международной системе ИАС и Единой системе оценки соответствия на объектах, подконтрольных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), и включает в себя более 10 испытательных и исследовательских лабораторий, оснащенных современным оборудованием, позволяющим проводить большинство необходимых для осуществления МЭ работ.

Рассмотрим в качестве примера МЭ неудовлетворительный результат ресурсных (усталостных) испытаний оси колесной пары локомотива. На поверхность оси, изготовленной из стали ОС по ГОСТ 4728-2010, с целью повышения ее износостойкости и усталостной прочности методом высокоскоростного плазменного напыления было нанесено покрытие NiCrBSi [12–14] толщиной функционального слоя от 0,125 до 0,5 мм с последующей шлифовкой.

Стендовые испытания данной оси круговым изгибом, которые должны проводиться на базе 50 млн циклов, были остановлены при наработке 20 млн циклов из-за образования глубокой усталостной трещины. После остановки испытаний сечения оси, содержащее усталостную трещину, было искусственно доломано (рис. 1 а). Внешний вид ответных частей излома приведен на рис. 1 б.

Пробоподготовку представленных на МЭ объектов проводили с использованием электроискрового проволочно-вырезного станка Sodick AG400L LN2W, отрезного станка Discotom-6 и ленточной пилы JET HBS-916W с применением системы охлаждения водой для предотвращения структурных изменений исследуемого металла.



а



б

Рис. 1. Ответные части излома оси колесной пары  
Fig. 1. Counterparts of the fractured axis of a wheelset

Химический состав определяли с помощью оптико-эмиссионного спектрометра Q4 TASMAR (Германия), механические испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине WDW-300E (Китай), испытания на ударную вязкость – на копре JB-W300 (Китай). Микроструктуру изучали на микроскопе Axiovert 40 MAT (Германия) с применением программы оценки качества структуры материалов Thixomet Pro (Россия) и объекта-микрометра. Твердость по Виккерсу измеряли при нагрузках 1 и 10 кг на твердомере HVS-50 (Китай).

Подготовка шлифов для исследования микроструктуры включала в себя заливку образцов в пластмассу на заливочном прессе SIMPLIMET 1000 и доводку поверхности на шлифовально-полировальном станке LaboPol-25 (производства Struers).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно визуальному осмотру излома (рис. 2 а) на нем присутствуют две характерные области: 40 % занимает гладкая поверхность, образование которой связано с продвижением усталостной трещины (поз. 1 на рис. 2 а); остальная поверхность с грубым развитым рельефом сформировалась в результате искусственного долома (поз. 2 на рис. 2 а). Обращает на себя внимание наличие по всему периметру сечения оси обособленного кольцевого слоя толщиной около 1 см (поз. 3 на рис. 2 а). Кроме того, на боковой поверхности оси вблизи излома присутствуют многочисленные трещины (рис. 2 б).

После проведения визуального осмотра требуется убедиться в надлежащем качестве металла объекта экспертизы и, прежде всего, в соответствии химического состава нормативной документации. Согласно проведенному химическому анализу металл оси полностью соответствует химическому составу марки стали ОС, заложенной в ГОСТ 4728-2010. Характеристики прочности и пластичности, определенные при одноосном растяжении образцов, вырезанных непосредственно из

оси (рис. 3), а также значения ударной вязкости соответствуют требованиям ГОСТ 4728-2010: предел текучести составляет 349 МПа (должен превышать 330 МПа), временное сопротивление равно 663 МПа (требуется >650 МПа), относительное удлинение – 23 % (должно превышать 19 %), ударная вязкость – 59...61 Дж/см<sup>2</sup> (в ГОСТ – от 34 Дж/см<sup>2</sup>).

Соответствие химического состава и стандартных механических свойств НД не может служить гарантией безопасной эксплуатации изделия, особенно в условиях циклического изменения нагрузки, при которых и работает ось колесной пары. Необходимо убедиться в отсутствии дефектов микро- и макроструктуры. Например, присутствие неметаллических включений недопустимых размеров может послужить очагом зарождения усталостной трещины.

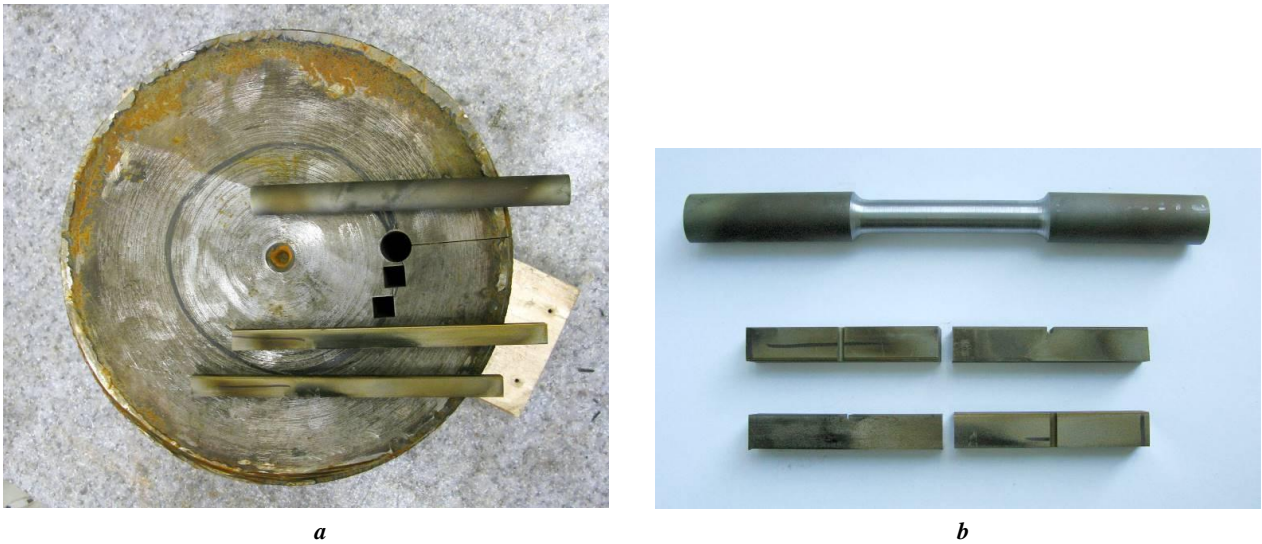
Согласно проведенному исследованию микроструктура стали оси представляет собой феррит + перлит с величиной зерна феррита G8, что соответствует требованиям п. 6.1.12 ГОСТ 33200-2014 (рис. 4). Контроль неметаллических включений, выполненный на нетравленных полированных образцах, выявил наличие сульфидов со средним баллом 0,4, что намного ниже требований ГОСТ 33200-2014 – не выше 1,5.

Для повышения эксплуатационных свойств поверхность оси положено упрочнять путем процедуры накатывания роликами, в результате которой согласно ГОСТ 33200-2014 твердость поверхностного слоя должна минимум на 20 % превышать твердость сердцевины. На рис. 5 приведены зависимости изменения твердости по Виккерсу от поверхности в сторону сердцевины. Согласно приведенным данным, твердость у поверхности составляет 225 HV1, что на 30 % выше, чем в сердцевине 175 HV1, т. е. соответствует требованиям ГОСТ 33200-2014.

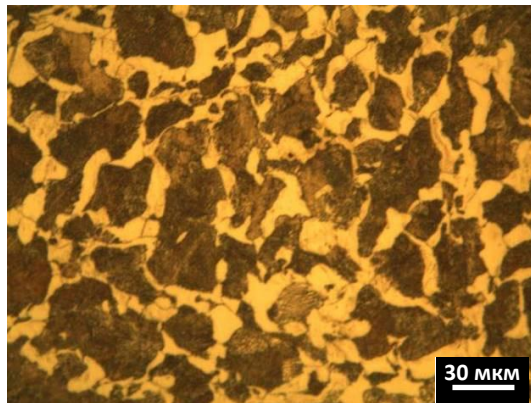
Исследование покрытия, нанесенного на ось методом высокоскоростного плазменного напыления, показало, что оно имеет толщину ~0,16 мм (рис. 6) и твердость (594÷671) HV0,3, что соответствует паспортным данным покрытия.



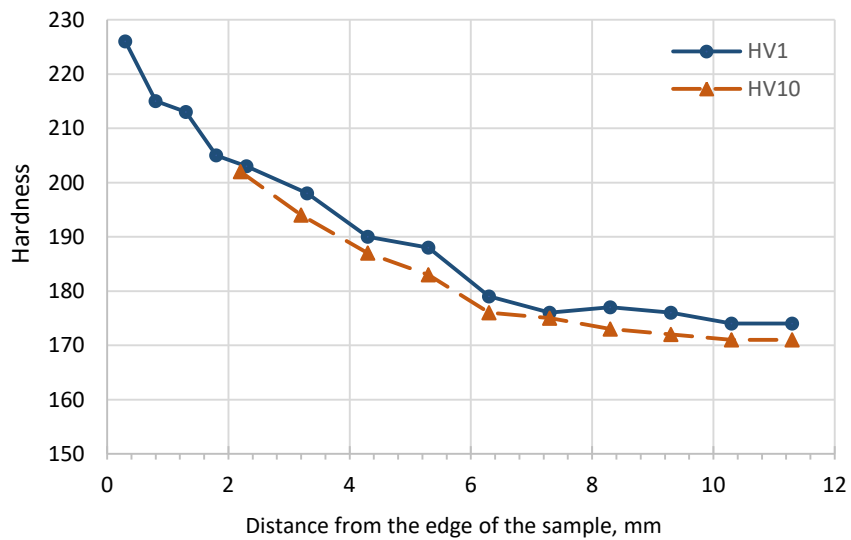
**Рис. 2.** Поверхность излома оси:  
*a* – общий вид с характерными зонами; *b* – трещины на боковой поверхности  
**Fig. 2.** The axis fracture surface:  
*a* – general view with the characteristic zones; *b* – side surface with cracks



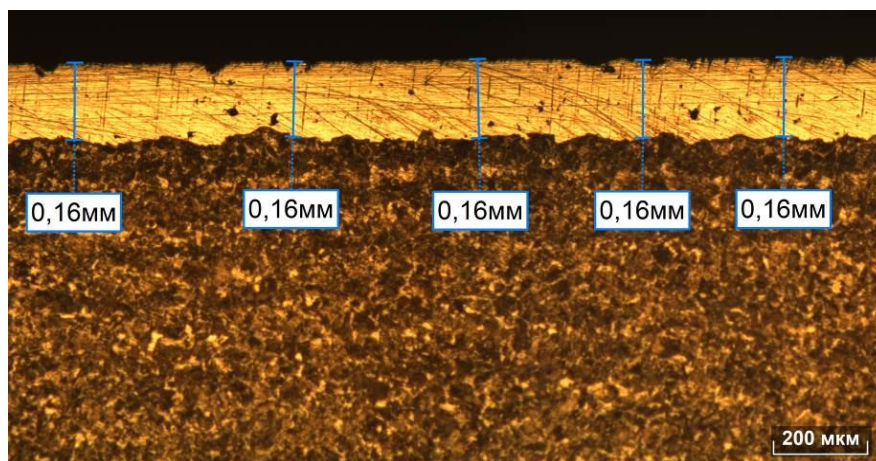
**Рис. 3.** Заготовки (а) и образцы (б) для механических испытаний  
**Fig. 3.** Blanks (a) and specimens (b) for mechanical testing



**Рис. 4.** Микроструктура оси  
**Fig. 4.** Microstructure of the wheelset axis



**Рис. 5.** График изменения твердости от поверхности оси в сторону сердцевины  
**Fig. 5.** The graph of the microhardness change of the wheelset axis depending on the distance from the surface



**Рис. 6.** Вид покрытия с результатами замера его толщины  
**Fig. 6.** The coating view with its thickness measurements

Во многих случаях установить природу разрушения помогает исследование морфологии поверхности разрушения (метод фрактографии) [15; 16]. Как уже было отмечено выше при визуальном осмотре, на изломе присутствуют две характерные для усталостного разрушения зоны: зона с гладким рельефом – область роста усталостной трещины (поз. 1 на рис. 2 а) и зона с развитой бугристой поверхностью, так называемым ручьи-стым узором, – область долома, в данном случае искусственного (поз. 2 на рис. 2 а). Отмеченная на рис. 2 а кольцевая область 3 толщиной около 1 см, очевидно, связана с упрочнением поверхности обкаткой роликами на аналогичную глубину около 1 см (рис. 5).

Согласно детальному анализу поверхности излома, в его усталостной зоне наблюдается несколько далеко отстоящих друг от друга участков с террасами (наплывами металла), расположенными на разных уровнях (рис. 7), что служит прямым доказательством многоочагового характера зарождения усталостного разрушения [17].

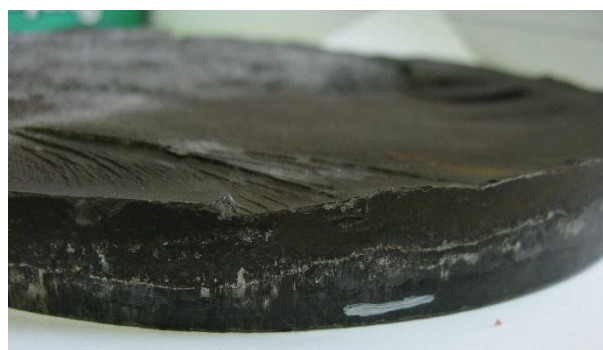
### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сделанный на основании фрактографического исследования вывод о многоочаговом характере разрушения является принципиальным, так как является доказательством того, что в данном случае разрушение оси

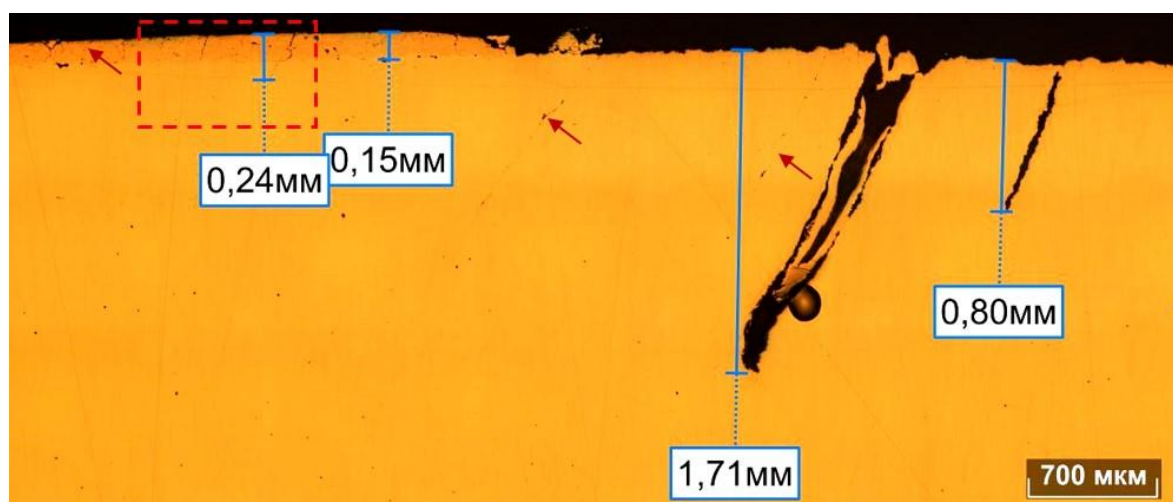
произошло не из-за какого-то единичного дефекта, а по объективной причине, перечень которых ограничен: (1) недостаточное качество основного металла оси; (2) некачественно проведенная операция накатки оси; (3) отрицательное влияние плазменного напыления покрытия; (4) неправильно проведенная процедура стендовых испытаний оси.

Приведенные выше результаты испытаний и исследований исключают первые две из рассмотренных в качестве основных причин преждевременного разрушения оси. Поскольку при проведении стендовых испытаний с помощью наклеенных тензодатчиков (на рис. 1 а указаны стрелками) регистрировались реально действующие напряжения, а не расчетные, то вероятность ошибки чрезвычайно мала.

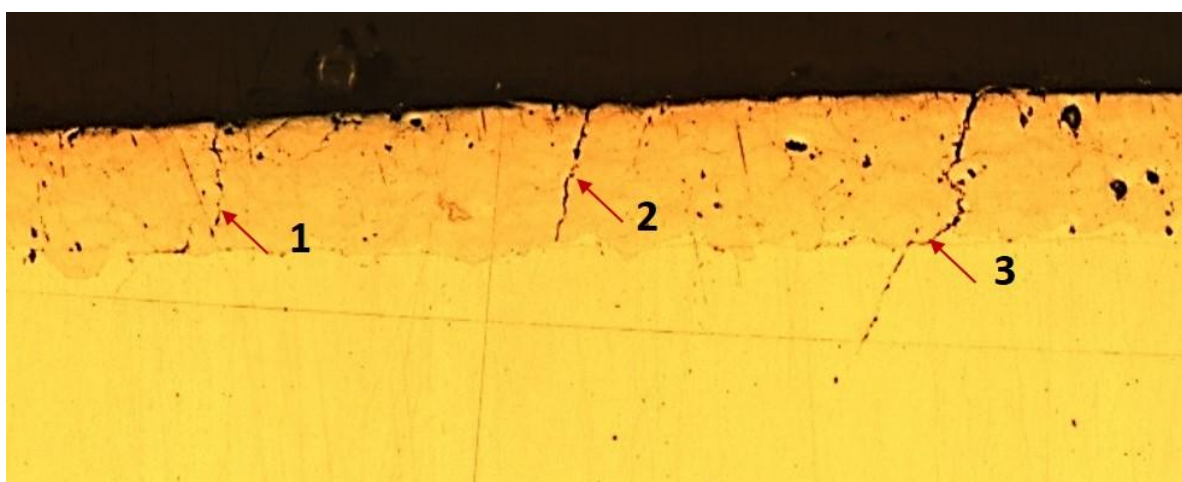
Для проверки роли покрытия в разрушении оси вблизи места визуально наблюдаемой трещины в продольном направлении был вырезан темплет. Изображение нетравленного шлифа темплета приведено на рис. 8. На правой стороне снимка присутствуют две макротрещины длиной 1,71 и 0,8 мм, расположенные под одинаковым углом к линии поверхности (рис. 8 а). Несколько левее расположены еще две зародышевые трещины под таким же углом (обозначены красными стрелками). Если в правой части снимка покрытие



**Рис. 7.** Террасы, расположенные в различных местах усталостной части излома  
**Fig. 7.** The multiple terraces along the fatigue part of the fracture surface



a



b

**Рис. 8.** Поверхностные трещины на продольном шлифе (а), последовательные этапы развития процесса разрушения (b)  
**Fig. 8.** The side surface cracks in the longitudinal cross-section (a), the successive steps of the fracture process (b)

отсутствует (выкрошилось), то в левой части покрытие имеется и по всей его длине присутствуют микротрещины, ориентированные под тем же самым углом к поверхности.

На рис. 8 b в увеличенном виде показан фрагмент, выделенный на рис. 8 a пунктирным прямоугольником, содержащий покрытие с микротрещинами. На рис. 8 b можно хорошо проследить весь процесс развития трещины, начиная от стадии зарождения. Сначала непосредственно в покрытии зарождается микротрещина (поз. 1 на рис. 8 b), далее эта микротрещина прошивает насквозь все покрытие и останавливается перед подложкой (поз. 2 на рис. 8 b). Острый кончик микротрещины, являясь мощным концентратором напряжений, способствует ее дальнейшему прорастанию в основной металл (поз. 3 рис. 8 b). Под действием знакопеременных напряжений такая микротрещина перерождается в усталостную макротрещину, подобную приведенным на рис. 8 a справа, при этом ее дальнейшее продвижение становится необратимым процессом [18].

Образование многочисленных трещин в приповерхностной зоне оси под одинаковым углом к линии поверхности не может произойти случайно. Поскольку для трещины 3 (рис. 8 b) перед переходом от дна покрытия в матрицу обязательно должна была произойти пауза, то образование указанных микротрещин и тем более макротрещин (рис. 8 a) не является следствием ударного воздействия при динамической разгрузке в момент искусственного долома оси.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований и испытаний можно сделать следующие основные выводы.

1. Неудовлетворительные ресурсные испытания оси колесной пары не связаны с ненадлежащим качеством изготовления оси, так как ее химический состав, прочностные свойства, микроструктура, содержание неметаллических включений и параметры упрочненного накаткой поверхностного слоя полностью удовлетворяют требованиям нормативной документации.

2. Многочисленные усталостные микротрещины изначально зародились в покрытии. Их прорастание в основной металл привело к образованию усталостных макротрещин на разных уровнях. Последующее слияние усталостных макротрещин привело к формированию обширной многоочаговой поверхности усталостного разрушения.

3. Основной причиной усталостного разрушения оси колесной пары является недостаточная усталостная прочность покрытия NiCrBSi, нанесенного методом высокоскоростного плазменного напыления, в условиях работы оси колесной пары.

4. Прежде чем проводить дорогостоящие натурные стендовые испытания, следовало провести усталостные испытания образцов материала оси с покрытием.

5. Металлографическая экспертиза является эффективным инструментом для осуществления обратной связи между качеством изделий на выходе и всей цепочкой операций при их изготовлении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Buechler T., Schumacher F., Reimann P., Zaeh M.F. Methodology for an automatic and early manufacturing technology selection on a component level // *Production Engineering*. 2022. Vol. 16. № 1. P. 23–41. DOI: [10.1007/s11740-021-01070-2](https://doi.org/10.1007/s11740-021-01070-2).
- Daniyan I., Mporfu K., Ramatsetse B., Zeferino E., Monzambe G., Sekano E. Design and simulation of a flexible manufacturing system for manufacturing operations of railcar subassemblies // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 54. P. 112–117. DOI: [10.1016/j.promfg.2021.07.018](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.018).
- Trzepieciński T., Dell'isola F., Lemu H.G. Multiphysics modeling and numerical simulation in computer-aided manufacturing processes // *Metals*. 2021. Vol. 11. № 1. Article number 175. DOI: [10.3390/met11010175](https://doi.org/10.3390/met11010175).
- Böhme S., Merson D., Vinogradov F. On subsurface initiated failures in marine bevel gears // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 110. Article number 104415. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2020.104415](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104415).
- Esmaeeli N., Sattari F., Lefsrud L., Macciotta R. Critical Analysis of Train Derailments in Canada through Process Safety Techniques and Insights into Enhanced Safety Management Systems // *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676. № 4. P. 603–625. DOI: [10.1177/03611981211062893](https://doi.org/10.1177/03611981211062893).
- Husaini L., Liza R.H., Nurdin A., Muammar S. Failure analysis of a fractured leaf spring as the suspension system applied on the dump truck // *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 892 KEM. P. 89–98. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.892.89](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.892.89).
- Boral S., Chakraborty S. Failure analysis of CNC machines due to human errors: An integrated IT2F-MCDM-based FMEA approach // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 130. Article number 105768. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2021.105768](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105768).
- Pan A.-X., Yang Z.-G. Cause analysis and countermeasure on premature failure of a driven gear for the high-speed train // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 139. Article number 106487. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2022.106487](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106487).
- Jimenez-Martinez M. Manufacturing effects on fatigue strength // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 108. Article number 104339. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2019.104339](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104339).
- McEvily A.J. *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention*. New York: Wiley, 2013. 506 p.
- Voort G.F. *Metallographic Techniques in Failure Analysis* // Failure Analysis and Prevention: ASM handbook archive. 2002. Vol. 11. P. 498–515. DOI: [10.31399/asm.hb.v11.a0003532](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.a0003532).
- Somervuori M., Varis T., Oksa M., Suhonen T., Vuoristo P. Comparative Study on the Corrosion Performance of APS-, HVOF-, and HVOF-Sprayed NiCr and NiCrBSi Coatings in NaCl Solutions // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. Vol. 31. № 5. P. 1581–1597. DOI: [10.1007/s11666-022-01389-x](https://doi.org/10.1007/s11666-022-01389-x).
- Afsous M., Shafyei A., Soltani M., Eskandari A. Characterization and Evaluation of Tribological Properties of NiCrBSi-Gr Composite Coatings Deposited on Stainless Steel 420 by HVOF // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020. Vol. 29. № 4. P. 773–788. DOI: [10.1007/s11666-020-00998-8](https://doi.org/10.1007/s11666-020-00998-8).
- Valíček J., Harničárová M., Řehoř J., Kušnerová M., Fulemová J., Gombár M., Kučerová L., Filipenský J., Hnátík J. Milling of complex surfaces of EN 10060 steel after HVOF sprayed NiCrBSi coatings // *Coatings*. 2020. Vol. 10. № 8. Article number 744. DOI: [10.3390/COATINGS10080744](https://doi.org/10.3390/COATINGS10080744).
- Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 264 с.
- Ameen M.S. *Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis*. Vol. 92. London: Geological Society Special Publication, 1995. 240 p. DOI: [10.1144/GSL.SP.1995.092.01.01](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.092.01.01).
- Лукьянов В.Ф., Ассауленко С.С. Имитационное моделирование многоочагового разрушения с учетом неоднородного распределения номинальных напряжений // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2015. Т. 15. № 4. С. 31–36. DOI: [10.12737/16071](https://doi.org/10.12737/16071).
- Bai Y., Xi Y., Gao K., Yang H., Pang X., Yang X., Volinsky A.A. Brittle coating effects on fatigue cracks behavior in Ti alloys // *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 125. P. 432–439. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2019.04.017](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.017).

### REFERENCES

- Buechler T., Schumacher F., Reimann P., Zaeh M.F. Methodology for an automatic and early manufacturing technology selection on a component level. *Production Engineering*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 23–41. DOI: [10.1007/s11740-021-01070-2](https://doi.org/10.1007/s11740-021-01070-2).
- Daniyan I., Mporfu K., Ramatsetse B., Zeferino E., Monzambe G., Sekano E. Design and simulation of a flexible manufacturing system for manufacturing operations of railcar subassemblies. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 54, pp. 112–117. DOI: [10.1016/j.promfg.2021.07.018](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.018).
- Trzepieciński T., Dell'isola F., Lemu H.G. Multiphysics modeling and numerical simulation in computer-aided

- manufacturing processes. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 1, article number 175. DOI: [10.3390/met11010175](https://doi.org/10.3390/met11010175).
4. Böhme S., Merson D., Vinogradov F. On subsurface initiated failures in marine bevel gears. *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 110, article number 104415. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2020.104415](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104415).
  5. Esmaeeli N., Sattari F., Lefsrud L., Macciotta R. Critical Analysis of Train Derailments in Canada through Process Safety Techniques and Insights into Enhanced Safety Management Systems. *Transportation Research Record*, 2022, vol. 2676, no. 4, pp. 603–625. DOI: [10.1177/03611981211062893](https://doi.org/10.1177/03611981211062893).
  6. Husaini L., Liza R.H., Nurdin A., Muammar S. Failure analysis of a fractured leaf spring as the suspension system applied on the dump truck. *Key Engineering Materials*, 2021, vol. 892 KEM, pp. 89–98. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.892.89](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.892.89).
  7. Boral S., Chakraborty S. Failure analysis of CNC machines due to human errors: An integrated IT2F-MCDM-based FMEA approach. *Engineering Failure Analysis*, 2021, vol. 130, article number 105768. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2021.105768](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105768).
  8. Pan A.-X., Yang Z.-G. Cause analysis and countermeasure on premature failure of a driven gear for the high-speed train. *Engineering Failure Analysis*, 2022, vol. 139, article number 106487. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2022.106487](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106487).
  9. Jimenez-Martinez M. Manufacturing effects on fatigue strength. *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 108, article number 104339. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2019.104339](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104339).
  10. McEvily A.J. *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention*. New York, Wiley Publ., 2013. 506 p.
  11. Voort G.F. Metallographic Techniques in Failure Analysis. *Failure Analysis and Prevention: ASM handbook archive*, 2002, vol. 11, pp. 498–515. DOI: [10.31399/asm.hb.v11.a0003532](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.a0003532).
  12. Somervuori M., Varis T., Oksa M., Suhonen T., Vuoristo P. Comparative Study on the Corrosion Performance of APS-, HVOF-, and HVOF-Sprayed NiCr and NiCrBSi Coatings in NaCl Solutions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2022, vol. 31, no. 5, pp. 1581–1597. DOI: [10.1007/s11666-022-01389-x](https://doi.org/10.1007/s11666-022-01389-x).
  13. Afsous M., Shafyei A., Soltani M., Eskandari A. Characterization and Evaluation of Tribological Properties of NiCrBSi-Gr Composite Coatings Deposited on Stainless Steel 420 by HVOF. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, no. 4, pp. 773–788. DOI: [10.1007/s11666-020-00998-8](https://doi.org/10.1007/s11666-020-00998-8).
  14. Valíček J., Harničárová M., Řehoř J., Kušnerová M., Fulemová J., Gombár M., Kučerová L., Filipenský J., Hnátík J. Milling of complex surfaces of EN 10060 steel after HVOF sprayed NiCrBSi coatings. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 8, article number 744. DOI: [10.3390/COATINGS10080744](https://doi.org/10.3390/COATINGS10080744).
  15. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fraktodiagnostika razrusheniya metallicheskih materialov i konstruksiy* [Fractodiagnosics of destruction of metallic materials and structures]. Moscow, MISiS Publ., 2007. 264 p.
  16. Ameen M.S. *Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis*. London, Geological Society Special Publ., 1995. Vol. 92, 240 p. DOI: [10.1144/GSL.SP.1995.092.01.01](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.092.01.01).
  17. Luk'yanov V.F., Assaulenko S.S. Simulation of multicentric destruction with regard for inhomogeneous distribution of rated voltage. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 31–36. DOI: [10.12737/16071](https://doi.org/10.12737/16071).
  18. Bai Y., Xi Y., Gao K., Yang H., Pang X., Yang X., Volinsky A.A. Brittle coating effects on fatigue cracks behavior in Ti alloys. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 125, pp. 432–439. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2019.04.017](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.017).

## Metallographic examination as the feedback between product quality and manufacturing

© 2022

**Dmitry L. Merson**<sup>\*1</sup>, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,  
Director of the Research Institute of Advanced Technologies  
**Anastasiya A. Karavanova**<sup>2</sup>, PhD (Engineering),  
Deputy Director of the Research Institute of Advanced Technologies  
**Aleksey V. Klimanov**<sup>3</sup>, graduate student  
of Chair “Nanotechnologies, Materials science and Mechanics”

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

\*E-mail: [d.merson@tltu.ru](mailto:d.merson@tltu.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-4115>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9192-525X>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3313-2398>

Received 20.02.2022

Accepted 21.05.2022

**Abstract:** Despite the increasing automation of the process of designing and manufacturing metal products, their failure remains a common phenomenon. The metallographic examination is appointed, which can only be carried out at a proper level by the specialized accredited organizations to identify the causes of such incidents. A metallographic examination is a tool that acts as feedback between the output quality of products and the entire chain of numerous operations during production. The purpose of this work is, using a practical example, to demonstrate the possibility and special significance of the conclusions of the metallographic examination for the development of the product manufacturing technology. Using the high-speed plasma spraying method, the authors applied the NiCrBSi coating to the surface of the locomotive wheel



pair axle to increase its wear resistance. The life bench tests of the axle revealed the main fatigue crack, the tests were stopped, and the axle was artificially broken completely. The analysis of metal quality, including chemical composition, mechanical properties (strength, ductility, and impact hardness), microstructure, metal purity according to the non-metallic inclusions, and parameters of a surface layer hardened by rolling, showed its full compliance with the regulatory documentation. The thickness and hardness parameters of the NiCrBSi coating also corresponded to the declared ones. According to the fractographic analysis, the fatigue fracture was initiated at multiple points, which was a characteristic sign of a common objective reason for the insufficient strength of a product not associated with some random factor. The metallographic examination identified that the main reason for the failure of a wheelset axle is the coating's insufficient fatigue strength. The numerous fatigue microcracks that originated in the coating grew into the base metal and led to the fatigue macrocracks formation at different height levels. The merging of these cracks led to widespread fatigue fracture surface formation.

**Keywords:** metallographic examination; testing; high-speed plasma spraying; structure; fatigue cracks.

**For citation:** Merson D.L., Karavanova A.A., Klimanov A.V. Metallographic examination as the feedback between product quality and manufacturing. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 54–62. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-54-62.