УДК 620.178.152:620.184.6

Д. В. Муравьев, А. А. Рауба
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

КОМПЛЕКСНАЯ ЭКСПЕРТИЗА ИЗЛОМОВ КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТОДАМИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация. *Статья посвящена анализу качества материалов для изготовления крепежных деталей подвижного состава. В работе представлены результаты исследований разрушенных в процессе эксплуатации деталей, используемых для крепления узлов ходовой части, рессорного подвешивания и ударно-тяговых устройств подвижного состава. Цель работы заключается в установлении вероятных причин разрушения деталей под действием статических и динамических нагрузок при движении по рельсовому пути. В работе описываются методология и последовательность проведения экспертизы материалов на основе анализа химического состава металлов, оценки механических свойств и изучения поверхностей изломов деталей. Представлены результаты спектрального анализа металла исследуемых деталей, измерения твердости и анализа поверхности изломов деталей, которые позволили установить возможные характер, последовательность и причины их разрушения. Полученные в ходе исследований результаты показали, что основной причиной изломов крепежных деталей подвижного состава является воздействие на них нагрузок, превышающих предел прочности металла. При этом установлено, что марка применяемого в производстве металла не соответствует требованиям нормативно-технической документации на изделие и не предназначена для изготовления крепежных деталей. Таким образом, полученные выводы подтверждают необходимость ужесточения контроля качества материалов, применяемых при производстве крепежных деталей подвижного состава, и могут использоваться на машиностроительных предприятиях, специализирующихся на производстве комплектующих и запасных частей для железнодорожного подвижного состава. Основной вывод работы заключается в необходимости использования при производстве деталей крепления ответственных узлов и агрегатов подвижного состава конструктивно обоснованных марок сталей и сплавов.*

Ключевые слова: *дефект, излом, разрушение, качество, материал, эксплуатация, анализ, твердость, сталь.*

Dmitry V. Muraviev, Aleksandr A. Rauba
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

COMPLEX EXAMINATION OF BREACHES OF FASTENING PARTS OF ROLLING STOCK BY METAL-GRAPHIC ANALYSIS METHODS

Abstract. *The article is devoted to the analysis of the quality of materials for the manufacture of fasteners for rolling stock. The paper presents the results of studies of parts destroyed during operation that are used for fastening the undercarriage assemblies, spring suspension and impact-traction devices of rolling stock. The purpose of the work is to establish the probable causes of the destruction of parts under the action of static and dynamic loads during movement on the track. The paper describes the methodology and sequence of examination of materials based on the analysis of the chemical composition of metals, the assessment of mechanical properties and the study of the surfaces of fractures of parts. The results of spectral analysis of the metal of the investigated parts, measurements of hardness and analysis of the surface of fractures of the parts are presented, which allowed to establish the possible nature, sequence and causes of their destruction. The results obtained in the course of the research showed that the main reason for the breaks in the fasteners of rolling stock is the impact on them of loads exceeding the tensile strength of the metal. It was found that the brand used in the production of metal does not meet the requirements of the normative-technical documentation for the product and is not intended for the manufacture of fasteners. Thus, the findings confirm the need to tighten the quality control of materials used in the manufacture of fasteners for rolling stock, and can be used in machine-building enterprises specializing in the production of components and spare parts for railway rolling stock. The main conclusion of the work is the need to use in the production of fastening parts of the responsible components and assemblies of rolling stock, structurally reasonable steels and alloys.*

Keywords: *defect, fracture, destruction, quality, material, operation, analysis, hardness, steel.*

Анализ статистических данных по дефектам, разрушениям и повреждениям крепежных деталей, которые применяются для фиксации узлов экипажной части, элементов рессорного

подвешивания и деталей автосцепного устройства подвижного состава, показал, что за последние два года на Западно-Сибирской железной дороге участились случаи катастрофического излома и разрушения крепежных болтов узлов и агрегатов вагонов и локомотивов в пути следования организованного поезда. Выявленные случаи приводили к падению незакрепленных деталей на рельсы и повреждению верхнего строения железнодорожного пути, остановке поездов, нарушению графиков их движения и т. д.

Установлено, что подобные дефекты могут приводить к следующим последствиям:

к нарушению динамических характеристик ходовой части подвижного состава в результате ослабления крепления узлов между собой и к кузову, что способствует повышению колебаний элементов, снижению скоростных показателей и общего КПД;

вероятности возникновения аварийных ситуаций в результате падения незакрепленных деталей на железнодорожные пути, что приводит к неплановым ремонтам подвижного состава, незапланированным расходам и угрозе безопасности движения в целом;

нарушению эффективности действия основных систем подвижного состава, а именно: тормозной системы, в результате ослабления крепления деталей тормозной рычажной передачи, системы гашения колебаний экипажной части, в результате ослабления крепления деталей рессорного подвешивания и системы автоматического сцепления единиц подвижного состава, в результате ослабления крепления деталей автосцепного устройства.

Таким образом, с целью установления возможных причин изломов крепежных деталей и предотвращения схожих по последствиям ситуаций в будущем была проведена научно-исследовательская работа по оценке качества и механических свойств материалов, используемых при изготовлении различных крепежных деталей подвижного состава.

Анализ априорной информации позволил установить, что основные причины возникновения подобных изломов можно условно разделить на три группы:

1) I группа – несоответствие химического состава и качества материалов для изготовления крепежных деталей требованиям нормативно-технической документации;

2) II группа – нарушение режимов и технологии изготовления и упрочнения крепежных деталей и, как следствие, ухудшение механических свойств материалов;

3) III группа – усталостные повреждения металла в процессе эксплуатации.

В рамках научно-исследовательской работы на базе испытательной лаборатории «Металловедение и структурный анализ металлов и сплавов» Омского государственного университета путей сообщения проводилась комплексная экспертиза качества материалов крепежных изделий подвижного состава, включающая в себя следующие этапы:

спектральный анализ химического состава металла исследуемых образцов разрушенных деталей на оптико-эмиссионном спектрометре «Аргон-5СФ» с целью определения марки материала детали и установления соответствия марки требованиям нормативно-технической документации на исследуемую крепежную деталь [1];

определение твердости металла в различных частях и сечениях исследуемых образцов для оценки эффективности термообработки металла при производстве деталей и обеспечения заданной твердости согласно требованиям нормативно-технической документации;

анализ поверхности изломов разрушенных деталей для определения вида излома, его характера, источника катастрофического разрушения с целью установления вероятных причин поломки крепежной детали [2].

Образцы деталей с изломами, поступившие с железнодорожных предприятий в период с мая 2017 г. по ноябрь 2018 г., прошли комплексную экспертизу в соответствии с описанным порядком. Среди деталей, повреждения которых серьезно повлияли на безопасность движения, можно выделить следующие: болт М12 крепления стопорной планки корончатой гайки М110×4 буксы тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-II, болт М16×240 крепления поводка тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-II, болты крепления ударной розетки автосцепного устройства укладочного крана УК-25/9-18.

Болт М12 крепления стопорной планки корончатой гайки М110×4 буксы тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-II исследовался на соответствие требованиям сертификата качества № 413Г01. В рамках данного исследования был проведен спектральный анализ образца металла болта, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа химического состава материала болта М12

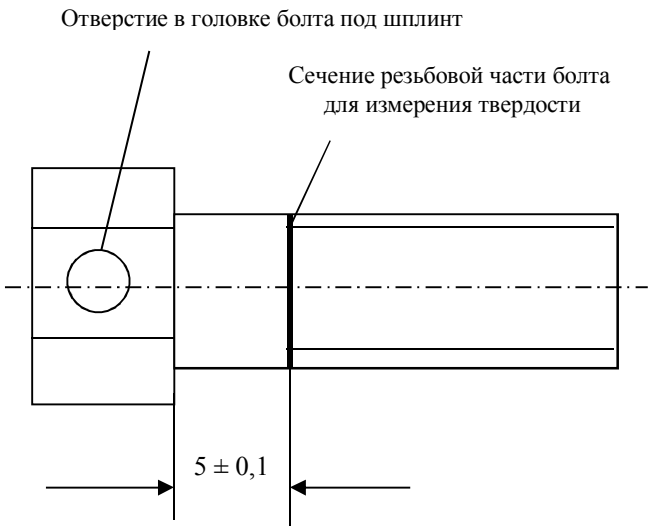
Образец	Дата	Время	*C*	*Si*	*P*	*S*	*Cr*	*Mn*	*Ni*	*Cu*	*As*
№1	15.05.17	20:01:13	0,129	0,241	0,011	0,019	0,065	0,471	0,125	0,203	0,009

Результаты соответствия исследуемой марки стали болта представлены в таблице 2.

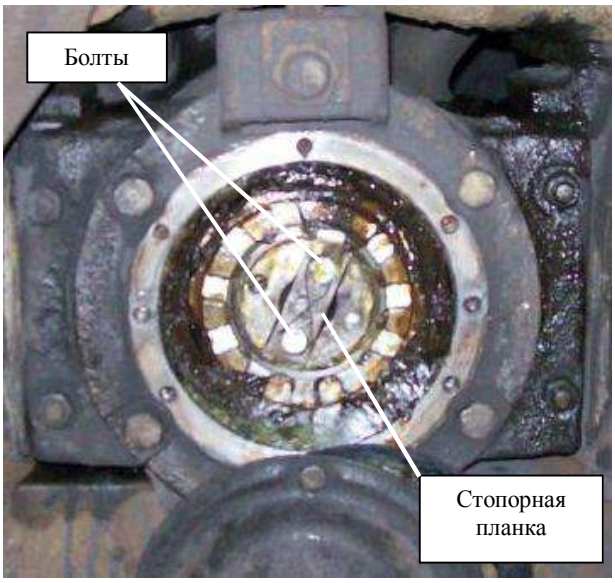
Таблица 2 – Отчет сортировки марок исследуемого материала болта М12

Элемент	Болт крепления стопорной планки (образец №1)	10, ГОСТ 1050-2013	15, ГОСТ 1050-2013	20, ГОСТ 1050-2013
C	0,130	0,0700 – 0,1400	0,1200 – 0,1900	0,1700 – 0,2400
Si	0,241	0,1700 – 0,3700	0,1700 – 0,3700	0,1700 – 0,3700
Mn	0,471	0,3500 – 0,6500	0,3500 – 0,6500	0,3500 – 0,6500
S	0,019	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400
P	0,011	0,0000 – 0,0350	0,0000 – 0,0350	0,0000 – 0,0350
Cr	0,065	0,0000 – 0,1500	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500
Ni	0,125	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500
Cu	0,203	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500
As	0,009	0,0000 – 0,0800	0,0000 – 0,0800	0,0000 – 0,0800

Механические испытания материала рабочей (резьбовой) части болта включали в себя измерение твердости образца по методу Роквелла по шкале *HRB* согласно требованиям сертификата качества № 413Г01. Измерения выполнялись на поверхности поперечного среза резьбовой части болта на расстоянии 5 ± 0,1 мм от головки болта (рисунок 1). Полученные значения твердости приведены в таблице 3.



а



б

Рисунок 1 – Болт крепления стопорной планки корончатой гайки М110×4 буксы тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-II: а – схема вырезки образца для измерения твердости; б – схема крепления болтами стопорной планки гайки на оси РУ1

Таблица 3 – Значения твердости исследуемого материала болта М12

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Среднее значение
Значение твердости, *HRB*	95,6	96,4	95,2	96,1	97,3	97,3	96,4	96,6	96,9	96,6	96,8	96,47

Установлено, что среднее значение твердости по результатам 11 измерений составило 96,47 HRB, что превышает пределы допустимых значений твердости 91 – 96 HRB, указанные в сертификате качества № 413Г01. Кроме того, было проведено измерение твердости материала головки болта в месте излома, результаты которого представлены на рисунке 2.

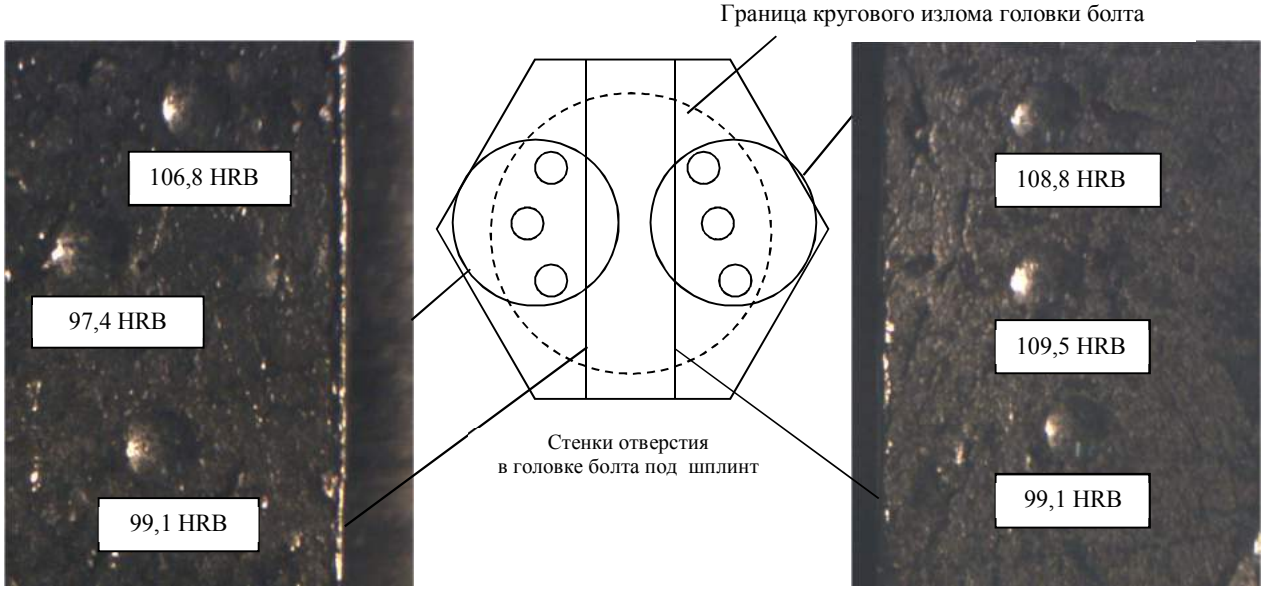


Рисунок 2 – Места определения твердости по поверхности излома головки болта

Проведенный анализ качества материала болта позволил получить следующие выводы относительно возможной причины разрушения исследованной детали.

1) Установлено, что марка материала болта в большей степени соответствует низкоуглеродистой стали 10, которая отличается от заявленной в сертификате качества № 413Г01 марки стали 20. Известно, что сталь 10 имеет значение временного сопротивления разрыву после нормализации 330 Н/мм^2, в то время как сталь 20 – 410 Н/мм^2 [3].

2) Полученные значения твердости показали, что в границах кругового излома головки болта (см. рисунок 2) твердость существенно превышает допустимые пределы (91 – 96 *HRB*) и имеет максимальное значение 109,5 *HRB*, а следовательно, материал обладал повышенной хрупкостью, что, вероятно, и явилось причиной катастрофического разрушения болта.

3) Кристаллический характер излома (см. рисунок 2), четкая круговая граница излома, радиальная направленность зернистой структуры и расслоения по границам зерен свидетельствуют о нечеткой структуре материала и хрупком разрушении головки болта [4].

Таким образом, предполагаемой причиной хрупкого разрушения головки болта по шплинтовому отверстию, которое сыграло роль концентратора напряжений в материале, явилось воздействие на деталь нагрузки, превысившей предел прочности конструктивно необоснованной стали 10, при условии повышенной твердости металла болта.

В соответствии с установленным порядком определение марки материала стопорного болта М16×240 (К-0493.00.00.009) поводка тележки пассажирского вагона также основывалось на проведении спектрального анализа металла болта по аналитической методике «Стали низко- и среднелегированные» на оптико-эмиссионном спектрометре «Аргон-5СФ», результаты которого приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты анализа химического состава материала болта М16×240

Образец	*C*	*Si*	*P*	*S*	*Cr*	*Mn*	*Ni*	*Cu*	*As*
Болт стопорный М16×240 К-0493.00.00.009	0,214	0,292	0,008	0,004	0,024	0,484	0,029	0,06	0,001

Результаты соответствия материала стопорного болта различным маркам сталей представлены в отчете сортировки в таблице 5.

Таблица 5 – Отчет сортировки марок исследуемого материала болта М16×240

Элемент	Болт стопорный М16×240 (К-0493.00.00.009)	Ст4сп, ГОСТ 380-2005	20, ГОСТ 1050-2013
C	0,214	0,1800 – 0,2700	0,1700 – 0,2400
Si	0,292	0,1500 – 0,3000	0,1700 – 0,3700
Mn	0,484	0,4000 – 0,7000	0,3500 – 0,6500
S	0,004	0,0000 – 0,0500	0,0000 – 0,0400
P	0,008	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0350
Cr	0,024	0,0000 – 0,3000	0,0000 – 0,2500
Ni	0,029	0,0000 – 0,3000	0,0000 – 0,2500
Cu	0,06	0,0000 – 0,3000	0,0000 – 0,2500
As	0,001	–	0,0000 – 0,0800

Определение твердости материала стопорного болта М16×240 проводилось по методам Роквелла по шкале *HRB* и Бринелля по шкале *HB* в соответствии с требованиями ГОСТ 1050-2013 и показало результаты, приведенные в таблице 6 [5]. Значения твердости указаны в соответствии с местами измерений в резьбовой части, представленными на рисунке 3.

Таблица 6 – Значения твердости материала болта М16×240 в контрольных точках

Номер контрольной точки определения твердости	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значение твердости по Роквеллу, *HRB*	86,5	87,3	86,3	88,0	81,4	86,0	83,9	83,9	84,7
Значение твердости по Бринеллю, *HB*	171	174	170	177	154	170	162	162	165

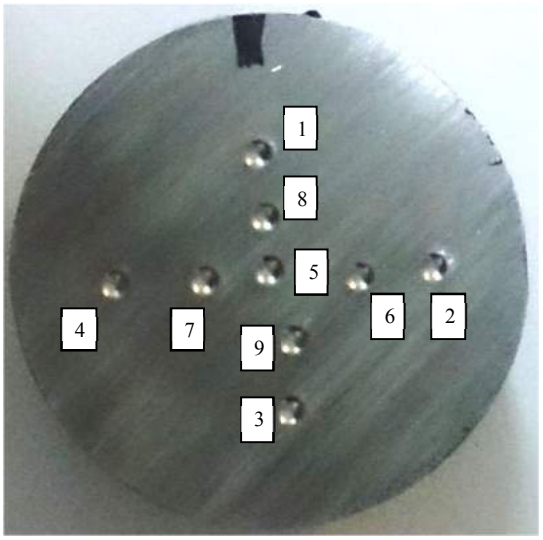


Рисунок 3 – Расположение контрольных точек определения твердости по сечению резьбовой части стопорного болта М16×240 поводка тележки пассажирского вагона

Установлено, что среднее значение твердости по результатам девяти измерений составило 85,33 *HRB*, что соответствует твердости по шкале Бринелля – 165 – 166 *HB* [6].

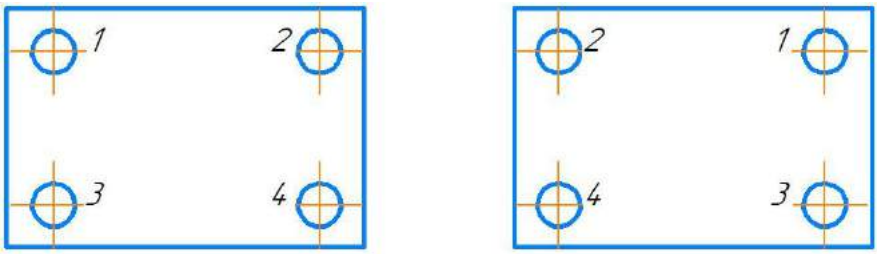
В ходе проведенных исследований качества материала болта получены выводы:

1) спектральный анализ образца стопорного болта показал соответствие исследуемого материала углеродистой конструкционной стали обыкновенного качества Ст4сп, которая предназначена для изготовления профильных металлоконструкций, и углеродистой конструкционной качественной стали 20 для производства метизов (см. таблицу 5);

2) установлено, что твердость материала болта согласно данным таблицы 6 варьируется в пределах 81,4 – 88,0 *HRB* (154 – 177 *HB*) и в контрольных точках № 1 – 4, № 6 и № 9 превышает на 4,1 – 7,9 % предельно допустимые значения твердости 163 *HB* по ГОСТ 1050-2013 для горячекатаного и кованного или калиброванного отожженного проката из стали 20 [7]. Механические испытания показали, что отделочная обработка поверхности прутка не проводилась, поскольку твердость стали ниже твердости нагартованного прутка 207 *HB*.

Таким образом, вероятной причиной поломки стопорного болта явилось воздействие на него нагрузки, превысившей предел прочности стали Ст4сп, не предназначенной для изготовления крепежных деталей. Если же предположить, что болт был изготовлен из стали 20 (см. таблицу 5), то в этом случае отсутствие упрочнения в условиях повышенной твердости стали могло послужить причиной снижения прочности и разрушения болта под нагрузкой.

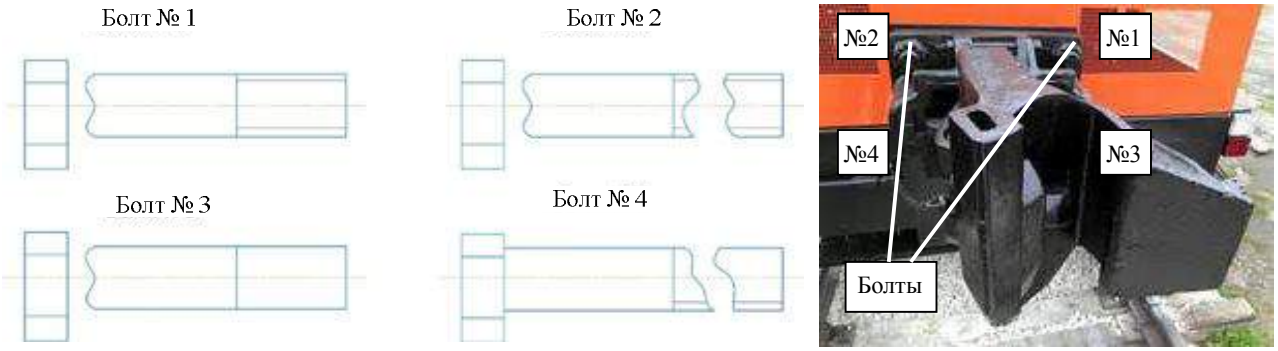
Разрушение болтов крепления ударной розетки к концевой балке рамы укладочного рельсового крана УК-25/9-18 привело к падению автосцепного устройства на путь и возникновению аварийной ситуации с угрозой безопасности движения. Болты с изломами, располагавшиеся относительно рамы укладочного крана и ударной розетки согласно схеме на рисунке 4, поступили в лабораторию для установления вероятных причин разрушения.



а б

Рисунок 4 – Условная схема расположения исследуемых болтов крепления автосцепного устройства: а – ударная розетка (вид с обратной стороны); б – концевая балка

Визуальный осмотр исследуемых болтов позволил установить, что правые верхний и нижний болты № 1 и № 3 имеют изломы у основания головки, левый верхний болт № 2 получил двойной излом у основания головки и в резьбовой части, а болт № 4 – излом в резьбовой части со следами пластической деформации металла при скручивании (рисунок 5).



а б

Рисунок 5 – Места расположения изломов исследуемых болтов крепления автосцепного устройства: а – болты с изломами по номерам; б – закрепленная автосцепка на раме крана (болты № 3 и № 4 не видны)

Для достижения поставленной цели экспертизы проводились следующие исследования:

1) спектральный анализ металла болтов для определения химического состава и марки сплава, использованного для их производства;

2) определение твердости материала болтов для оценки механических свойств и их соответствия требованиям ГОСТ Р ИСО 898-1-2011 «Механические свойства крепежных изделий из углеродистых и легированных сталей. Часть 1: Болты, винты и шпильки установленных классов прочности с крупным и мелким шагом резьбы» [8];

3) анализ поверхностей изломов для определения вида и характера изломов, мест зарождения изломов, концентраторов напряжений и направлений разрушения материала.

В результате проведенных исследований были получены следующие выводы:

1) визуальный осмотр всех болтов показал отсутствие галтелей в местах сопряжения головок болтов и цилиндрической рабочей части, что является недопустимым, поскольку приводит к возникновению концентраторов напряжений и, соответственно, к образованию круговых трещин в основании головок болтов, а также противоречит техническим требованиями конструкторского чертежа;

2) спектральный анализ материала показал, что болты № 1, № 3 и № 4 соответствуют по химическому составу конструкционной качественной стали 20 пс и стали обыкновенного качества Ст3пс, которая применяется для изготовления металлоконструкций, работающих при положительных температурах. В свою очередь материал болта № 2 соответствует стали 40, а также идентичен по химическому составу литейным сталям 40Л и 35Л (таблица 7), что является отступлением от требований чертежа. Кроме того, сталь 40, содержащая согласно проведенному спектральному анализу 0,28 % кремния (таблица 8), обладает после нормализации пониженной пластичностью (ψ = 40 %) и ударной вязкостью (KCU = 44 Дж/см^2) в сравнении со сталью 20 пс, что, соответственно, могло стать причиной разрушения болта № 2 в основании головки и резьбовой части при отсутствии переходных галтелей;

Таблица 7 – Отчет сортировки марок исследуемого материала болта крепления ударной розетки

Элемент	Болт автосцепки укладочного крана (обр. № 2)	40, ГОСТ 1050-2013	40Л, ГОСТ 977-88	35Л, ГОСТ 977-88
C	0,392	0,3700 – 0,4500	0,3700 – 0,4500	0,3200 – 0,4000
Si	0,280	0,1700 – 0,3700	0,2000 – 0,5200	0,2000 – 0,5200
Mn	0,662	0,5000 – 0,8000	0,4500 – 0,9000	0,4500 – 0,9000
S	0,026	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400
P	0,019	0,0000 – 0,0350	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400
Cr	0,173	0,0000 – 0,2500	–	–
Ni	0,126	0,0000 – 0,2500	–	–
Cu	0,094	0,0000 – 0,2500	–	–
As	0,001	0,0000 – 0,0800	–	–

Таблица 8 – Результаты анализа химического состава материала болта крепления ударной розетки

Образец	*C*	*Si*	*P*	*S*	*Cr*	*Mn*	*Ni*	*Cu*	*As*
Болт автосцепки укладочного крана (обр. № 2)	0,392	0,28	0,019	0,026	0,173	0,662	0,126	0,094	0,001

3) в соответствии с ГОСТ Р ИСО 898-1-2011 твердость стали для изготовления болтов, измеренная по методу Роквелла, должна составлять 67 – 95 *HRB*. Проведенные измерения твердости по методу Роквелла по шкале *HRB* показали, что твердость материала всех болтов находится в пределах нормы, однако при этом твердость стали 40 болта № 2 составляет 83,8 – 89,1 *HRB* и превышает твердость сталей 20пс и Ст3пс остальных болтов в 61,9 –

73,4 *HRB* в среднем на 15 – 20 %, что свидетельствует о ее пониженной ударной вязкости и пластичности;

4) макроструктурный анализ образцов показал, что по краям изломов болтов № 1, № 2 и № 3 (рисунок 6, а – в) в местах сопряжения головки и тела болта имеются неглубокие следы круговой коррозии длиной 30 – 50 мм и глубиной от 1 до 1,6 мм, свидетельствующие об имевшихся на момент разрушения микротрещинах, которые способствовали ускоренному излому головок болтов [9]. Отсутствие галтелей в местах наличия трещин усугубило процесс разрушения крепежных деталей [10].



Рисунок 6 – Поверхности изломов болтов крепления ударной розетки автосцепного устройства к концевой балке: а – излом головки болта № 1; б – излом головки болта № 2; в – излом головки болта № 3; г – излом резьбовой части болта № 1; д – излом резьбовой части болта № 2; е – излом резьбовой части болта № 3

5) исследуемые образцы имеют волокнистые (матовые) изломы, свидетельствующие о вязком характере разрушения болтов. Однако на поверхностях волокнистых изломов болтов № 1 и № 3, а также, в большей степени, болта № 2 присутствуют следы камневидного излома с гладкой блестящей поверхностью зерен (рисунок 6, г – е), характерного для перегретых сталей или возникающего в случае распространения трещин по границам зерен, что могло спровоцировать ускоренное разрушение болтов. Данный факт может указывать на превышение температуры нагрева стали 40 при нормализации в процессе изготовления болта № 2, что подтверждается более высокими значениями его твердости. Кроме того, на поверхности излома резьбовой части болта № 2 хорошо заметна обрывистая поверхность долома болта по окончании вязкого разрушения (см. рисунок 6, д).

Таким образом, проведенная экспертиза металла болтов позволила установить следующее.

Предположительно излом болтов крепления ударной розетки начался с левого верхнего болта № 2 (см. рисунок 4, б) в месте соединения головки с телом болта из-за наличия кру-

говой микротрещины (см. рисунок 6, б, д), отсутствия галтели и в резьбовой части, а также пониженной пластичности и ударной вязкости стали 40, использованной при изготовлении данного болта. После излома верхнего левого болта № 2 произошел одномоментный излом болтов № 1 и № 3 в местах наибольшей концентрации напряжений в основании головок болтов, где также имелись микротрещины (см. рисунок 6, а, в, г, е) и отсутствовали галтели, в результате действия на них возросших продольно-динамических усилий в составе поезда. После разрушения трех болтов ударная розетка удерживалась на концевой балке крана на одном болте № 4 и, соответственно, создаваемый при этом крутящий момент стремился повернуть ударную розетку относительно оси болта (рисунок 7), нарушив соединение автосцепного устройства с рамой кузова.

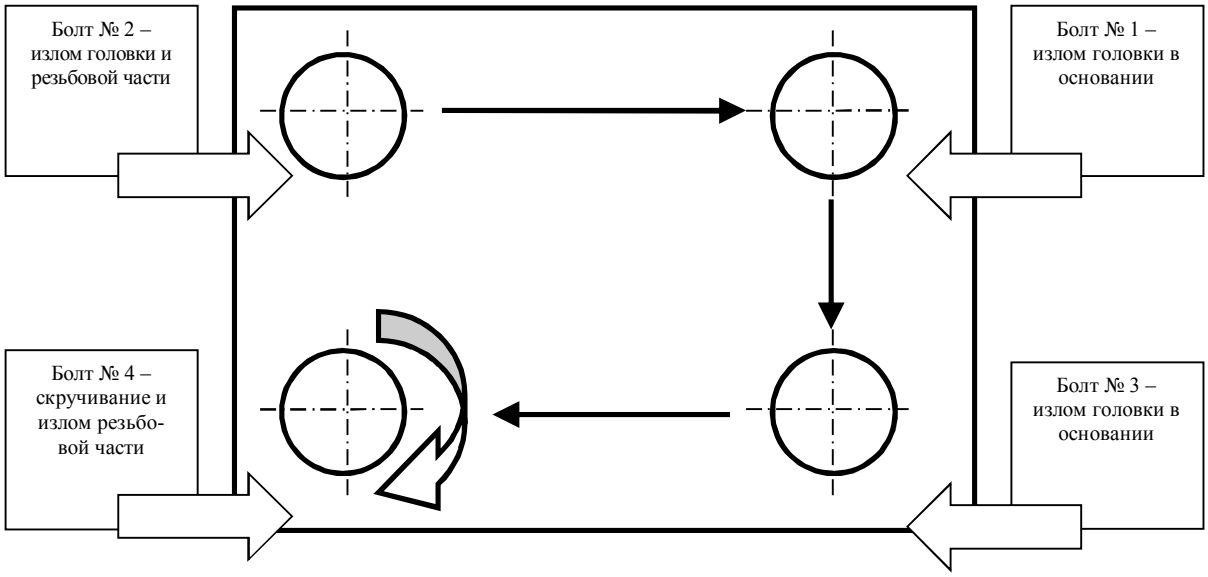


Рисунок 7 – Вероятная схема разрушения болтов крепления ударной розетки автосцепного устройства к концевой балке

В результате этого возникла существенная скручивающая сила, которая привела к пластической деформации и излому болта № 4 в резьбовой части (рисунок 8).



а б

Рисунок 8 – Излом болта № 4 крепления ударной розетки автосцепного устройства: а – общий вид излома; б – излом резьбовой части со следами пластической деформации и разрыва витков резьбы

Обосновав и подытожив результаты проведенных исследований, можно сделать выводы:

1. Установлено, что часто для изготовления крепежных деталей подвижного состава применяются конструкционные качественные стали или стали обыкновенного качества, имеющие пониженные механические свойства и не предназначенные для этих целей, что является прямым нарушением требований нормативно-технической документации на крепежные изделия. Это происходит по двум основным причинам: нарушение требований сертификационных документов на крепежные изделия на заводе-изготовителе или производство деталей крепления собственными силами на ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта из некачественных сплавов неизвестных марок.

2. Выявлено нарушение технологии изготовления крепежных деталей и несоблюдение требований конструкторских чертежей при производстве изделий, которое выражается в пренебрежении операциями либо нарушении режимов термической и химико-термической обработки болтов крепления, а также в отсутствии операций протачивания переходных галтелей в основании головок болтов, что приводит к появлению концентраторов напряжений, трещин и снижению общей конструкционной прочности изделия. Именно отсутствие галтелей стало одной из причин разрушения болтов крепления ударной розетки автосцепного устройства укладочного рельсового крана УК-25/9-18.

3. Кроме того, выявлено нарушение периодичности и технологии неразрушающего контроля болтов при проведении технического обслуживания или текущего ремонта подвижного состава. Можно предположить, что проведенное незадолго до разрушения болтов крепления ударной розетки техническое обслуживание либо было выполнено некачественно, либо не проводилось вовсе, поскольку не обнаружило микротрещин в местах соединения тела и головки болтов, что впоследствии привело к их разрушению.

Список литературы

1. Беккер, Ю. Спектроскопия [Текст] / Ю. Беккер. – М.: Техносфера, 2009. – 527 с.

2. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей [Текст] / М. А. Балтер, А. П. Любченко и др. – М: Машиностроение, 1987. – 160 с.

3. Марочник сталей и сплавов [Текст] / А. С. Зубченко, М. М. Колосков и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

4. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. Методические указания. РД-50-672-88. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 21 с.

5. Солнцев, Ю. П. Материаловедение: Учебник [Текст] / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб: Химиздат, 2007. – 784 с.

6. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: Учебное пособие [Текст] / Т. Ю. Степанова / Ивановский гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.

7. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.

8. ГОСТ Р ИСО 898-1-2011. Механические свойства крепежных изделий из углеродистых и легированных сталей. Часть 1: Болты, винты и шпильки установленных классов прочности с крупным и мелким шагом резьбы. – М.: Стандартинформ, 2013. – 54 с.

9. Терентьев, В. Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учебное пособие [Текст] / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2001. – 61 с.

10. Пачурин, Г. В. Повышение коррозионной долговечности и эксплуатационной надежности изделий из деформационно-упрочненных металлических материалов: Учебное пособие [Текст] / Г. В. Пачурин / Нижегородский гос. техн. ун-т. – Нижний Новгород, 2005. – 132 с.

References

1. Bekker Y. U. *Spektroskopiya* (Spectroscopy). Moscow: Tekhnosfera, 2009, 527 p.

2. Balter M. A., Lyubchenko A. P. *Fraktografiya – sredstvo diagnostiki razrushennyh detalej* (Fractography – a tool for diagnosing damaged parts). Moscow: Mashinostroenie, 1987. 60 p.

3. Zubchenko A. S., Koloskov M. M. *Marochnik stalej i splavov* (Marker of steel and alloys). Moscow: Mashinostroenie, 2003, 784 p.

4. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Klassifikaciya vidov izlomov metallov. Metodicheskie ukazaniya. RD-50-672-88* (Calculations and strength tests. Classification of types of fractures of metals. GD-50-672-88). Moscow: Standarty, 1981, 21 p.

5. Solncev YU. P. *Materialovedenie: Uchebnik dlya vuzov* (Materials Science). SPb.: HIMIZDAT, 2007, 784 p.

6. Stepanova T. YU. *Tekhnologii poverhnostnogo uprochneniya detalej mashin: uchebnoe posobie* (Surface hardening technology for machine parts). Ivanovo, 2009, 64 p.

7. *Metalloprodukciya iz nelegirovannyh konstrukcionnyh kachestvennyh i special'nyh stalej Obshchie tekhnicheskie usloviya. GOST 1050-2013.* (Metal products from non-alloyed constructional quality and special steels. General technical conditions. State Standart 1050-2013). Moscow, 2014, 32 p.

8. *Mekhanicheskie svojstva krepezhnyh izdelij iz uglerodistyh i legirovannyh stalej. CHast' 1: Bolty, vinty i shpil'ki ustanovlennyh klassov prochnosti s krupnym i melkim shagom rez'by GOST R ISO 898-1-2011.* (Mechanical properties of fasteners made of carbon and alloyed steels. Part 1: Bolts, screws and studs established strength classes with large and fine thread pitch. State Standart ISO 898-1:2009). Moscow: Standartinform, 2013, 54 p.

9. Terent'ev V. F., Oksogoev A. A. *Ciklicheskaya prochnost' metallicheskih materialov: Ucheb. posobie* (Cyclic strength of metallic materials). Novosibirsk, 2001, 61 p.

10. Pachurin G. V. *Povyshenie korrozionnoj dolgovechnosti i ehkspluatacionnoj nadezhnosti izdelij iz deformacionno-uprochnennyh metallicheskih materialov: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* (Improving the corrosion durability and operational reliability of products made of strain-strengthened metallic materials). Novgorod, 2005, 132 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Муравьев Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Muraviev Dmitry Valerievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

Рауба Александр Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-11.
E-mail: RaubaAA@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Муравьев, Д. В. Комплексная экспертиза изломов крепежных деталей подвижного состава методами металлографического анализа [Текст] / Д. В. Муравьев, А. А. Рауба // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 10 – 21.

Rauba Aleksandr Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-11.
E-mail: RaubaAA@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Muraviev D. V., Rauba A. A. Complex examination of breaches of fastening parts of rolling stock by metalgraphic analysis methods. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 4, no 36, pp. 10 – 21 (In Russian).

УДК 629.472.3

К. В. Панов
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЕПОВСКОГО РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕПЛАНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Аннотация. *В данной статье представлено решение задач эффективности функционирования производственных систем локомотиворемонтного предприятия. В частности, объектом исследования являются технологические процессы ремонта и сервисного технического обслуживания электровозов на предприятиях по ремонту тягового подвижного состава. В статье приведено математическое описание производственного процесса подобных предприятий на примере сервисного локомотивного депо Московка. Математическая модель описана на основе теории массового обслуживания (СМО) и цепей Маркова. Приведен граф технологического состояния локомотива во время ремонта в депо, где процесс перехода ремонтируемого подвижного состава из состояния в состояние, т.е. взаимосвязи технологических перемещений электровоза по территории депо, а также время выполнения технологических операций описаны переходной матрицей. Распределение заявок на ремонт описано при помощи закона Пуассона, задержка электровоза на участках депо на плановых видах ремонта – в соответствии с принятой нормой, а на неплановом виде ремонте заявки задерживаются в соответствии с распределением Эрланга.*

По результатам математического описания модели производственного процесса ремонтного предприятия создана имитационная модель функционирования депо Московка, реализованная на ЭВМ при помощи профессионального программного обеспечения нового поколения AnyLogic. В работе описаны логическая схема имитационной модели, выбранные методы и библиотеки моделирования. По результатам исследования проведена общая оценка технологических показателей работы локомотиворемонтного предприятия в условиях вероятностных динамических изменений ремонтного задания.

При помощи реализованных предложенных в статье методов исследования технологических процессов депо Московка можно проектировать любые ремонтные предприятия по ремонту подвижного состава железных дорог с целью выявления «узких мест» производственного процесса.

Ключевые слова: *имитационное моделирование, ремонт подвижного состава, депо, теория массового обслуживания, anylogic, граф состояний, матрица переходов, производственный процесс.*