

К вопросу о совершенствовании расчетов рельсов на прочность

Е. А. ШУР

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Рассмотрены три вида расчетов рельсов на прочность: расчет циклической прочности рельсов при недопущении образования усталостных трещин в подошве и шейке; расчет циклической контактной прочности при недопущении в пределах ресурса (или регламентации вероятности) образования трещин контактной усталости в головке регламентированного вида и размера, а также расчет живучести рельсов с учетом наличия усталостных трещин при недопущении полного хрупкого разрушения всего сечения. Основное внимание уделено определению допускаемых напряжений при расчете на циклическую прочность, учету масштабного фактора при расчете циклической контактной прочности, а также определению продолжительности развития усталостных трещин и их критической величины при расчете живучести. Действующие документы, касающиеся расчетов рельсов на прочность, усталости и требуют разработки новых.

Ключевые слова: рельсы; расчеты на прочность; усталость; контактная усталость; живучесть

Введение. Начиная с работ профессора Михаила Феликсовича Вериги [1] в качестве главного концептуального положения в расчетах рельсов на прочность при выборе допускаемых напряжений был принят отказ от пределов текучести при статическом нагружении [2] и совершен переход к пределам выносливости при циклическом нагружении. Таким образом, расчет рельсов на прочность должен проводиться, как и все расчеты на прочность деталей машин при нагрузках, переменных во времени [3]. Предполагалось, что на первом этапе прочностные расчеты рельсов проводятся по коэффициентам запаса прочности, как это было сделано для рам локомотивных тележек [4], с учетом асимметрии цикла нагружения, концентрации напряжений, качества поверхности, остаточных напряжений и ряда других факторов, оказывающих существенное влияние на сопротивление усталости. Дальнейший прогресс в развитии методов расчета рельсов на прочность при переменных напряжениях связан с внедрением в практику расчетов вероятностных представлений.

Возможно проведение пяти видов расчетов рельсов на основе следующих пяти видов их несущей способности [5]:

1) циклической при недопущении образования усталостных трещин в подошве и шейке;

2) циклической контактной при недопущении в пределах ресурса (или регламентации вероятности) образования трещин контактной усталости в головке регламентированного вида и размера;

3) живучести с учетом наличия дефектов и трещин при недопущении полного хрупкого разрушения всего сечения;

4) статической при недопущении пластических деформаций в подошве;

5) статической контактной при недопущении (или регламентации) местных пластических деформаций в зоне контакта головки с колесом.

Наибольшее практическое значение в настоящее время имеют первый, второй и третий виды расчетов.

Расчет циклической прочности рельсов при недопущении образования усталостных трещин в подошве и шейке. Расчет рельсов заключается в сопоставлении параметров внешней нагруженности рельсов и механических свойств, характеризующих способность рельсов сопротивляться внешнему воздействию при нагрузках, переменных во времени.

Интенсивность внешнего воздействия на протяжении многих лет определяют опытным путем. Для получения разрешения допуска нового подвижного состава к обращению на сети общего пользования проводится экспериментальное подтверждение выполнения требований по ограничению его воздействия на путь и стрелочные переводы [6, 7]. Накоплены многочисленные экспериментальные данные о максимальных величинах напряжений в наружной кромке подошвы рельсов в зависимости от величины осевых нагрузок, скоростей движения, радиусов кривых, конструкции и состояния экипажной части подвижного состава и пути. При этом максимальные значения напряжений в наружной кромке подошвы рельсов достигали 180 – 190 МПа [6]. Если учесть растягивающие напряжения, которые зимой в бесстыковом пути могут достигать до 100 – 150 МПа, вряд ли можно продолжать пользоваться старой нормой допускаемых растягивающих напряжений, равной 240 МПа. К сожалению, недостаточное внимание в последние годы уделяется установлению коэффициента асимметрии цикла по экспериментальным данным, которые очень важны при расчетах на усталость [8].

■ E-mail: shurea@mail.ru (Е. А. Шур)

Таблица 1

Оценочные критерии прочности пути [10]

Table 1

Evaluation criteria of track strength [10]

Критерии	Вид подвижного состава	Значения оценочных критериев прочности, МПа, при грузонапряженности, млн ткм брутто/км в год			
		более 50	50 – 25	24 – 10	менее 10
[σ_k], нетермоупрочненные рельсы	Локомотивы	190	200	240	340
	Вагоны	150	160	200	300
[σ_k], термоупрочненные рельсы	Локомотивы	217	228	274	388
	Вагоны	171	182	228	342

На протяжении последних 60 лет допускаемые динамические напряжения растяжения в кромках подошвы рельса в кривых и прямых участках железнодорожного пути [2, 9] оставались неизменными и равными 240 МПа, а допускаемые напряжения в кромках подошвы острижков стрелочных переводов — 275 МПа. На этом показателе никак не сказалось существенное усиление железнодорожного пути, происшедшее за это время, в частности полная замена горячекатаных нетермоупрочненных рельсов твердостью НВ 260 сначала на объемнозакаленные, а затем и на дифференцированно-упрочненные с твердостью более НВ 350, замена деревянных шпал на железобетонные, усиление балластной призмы и другие прогрессивные мероприятия, осуществленные в области железнодорожного пути. Наоборот, в методике [10] допускаемые напряжения растяжения в кромке подошвы рельса, обусловленные его изгибом и кручением вследствие вертикального и поперечного горизонтального воздействия колес подвижного состава, в целях маскировки названные «оценочными критериями прочности пути», даже уменьшены для большинства участков пути (табл. 1). Хотя в методике [10] имеется указание, что данные табл. 1 применимы только для рельсов, лежащих в прямых и кривых радиусом более 1000 м, нельзя согласиться с использованием столь низких величин допускаемых напряжений.

Отрицательное влияние на долговечность рельсов повышения осевых нагрузок, скоростей движения и уменьшения радиусов кривых связано с ростом силовых воздействий на путь и требует лишь количественного определения. Что касается влияния грузонапряженности, то природа отрицательного влияния увеличения грузонапряженности на долговечность рельсов продолжает оставаться неясной. С одной стороны, повышение грузонапряженности, как правило, сопровождается увеличением осевых нагрузок, повышением весовых норм поездов, изменениями в содержании пути, что вполне может снижать долговечность рельсов. С другой стороны, повышение грузонапряженности,

сопровожающееся сокращением пауз в нагружении (перерывов между поездами), может в «чистом» виде приводить к снижению долговечности. Физическая природа влияния более продолжительных перерывов в нагружении связана с отдыхом. Влияние отдыха тем значительнее, чем больше температура и продолжительность отдыха, а также чем меньше число циклов нагружения между перерывами. Концентрация напряжений несколько уменьшает, но не устраняет благотворное влияние отпуска. Увеличение долговечности за счет отдыха может быть объяснено с точки зрения статистической теории усталостной прочности и упрочнения наиболее слабых участков в результате старения, протекающего при отдыхе, а также релаксационных явлений.

Проведенные экспериментальные работы [11] с использованием специальных машин для испытаний на усталость с программированным нагружением на рельсовых сталях дали возможность оценить порядок уменьшения долговечности за счет уменьшения пауз между блоками нагружений, имитирующих увеличение грузонапряженности. Оказалось, что при этом снижение долговечности не превышало 15%, что соответствовало снижению предела выносливости не более чем на 10 – 15 МПа. Такое снижение пределов выносливости несопоставимо с уменьшением оценочных критериев прочности при изменении грузонапряженности на 150 – 170 МПа (см. табл. 1).

Механические свойства, характеризующие способность рельсов сопротивляться внешнему воздействию, определяют с помощью специальных испытаний.

В последний, действующий в настоящее время стандарт ГОСТ Р 51685 – 2013 с изменением № 1 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия», разработанный с учетом основных положений европейского регионального стандарта EN 13674 – 1:2011 «Железные дороги. Путь. Рельсы. Часть 1. Рельсы Виньоля 46 кг/м и более», в качестве технических требований впервые введены предел выносливости рельсов и циклическая трещиностойкость при испытании

полнопрофильных рельсовых проб, циклическая долговечность, скорость роста усталостной трещины и статическая трещиностойкость при испытании образцов.

Определение предела выносливости рельсов проводят путем циклических испытаний полнопрофильных проб длиной 1200+10 мм, вырезанных из рельсов методами холодной механической резки. Схема нагружения — плоский трехточечный симметричный изгиб. Расстояние между опорами 1000 ± 5 мм. Верхний пуансон устанавливают посередине между опорами — 500 ± 5 мм. Пробы испытывают при мягком нагружении (управление по усилию) в положении рельса головкой в зоне растяжения при асимметрии цикла нагружения плюс 0,1. База испытаний — 2 млн циклов. К настоящему времени накоплена огромная база экспериментальных данных о сопротивлении усталости различных категорий рельсов. Подавляющее большинство данных относится к циклическим испытаниям рельсов головкой в зоне растяжения. Имеются данные, полученные при испытании подошвой в зоне растяжения [12], а также и при симметричном знакопеременном цикле нагружения с асимметрией цикла минус 1.

Натурные испытания на усталость успешно применялись при оптимизации технологии производства термоупрочненных рельсов [13]. Поскольку результаты закалки зависят не только от температуры, длительности нагрева, скорости охлаждения, но и от исходной структуры стали, т. е. от степени дисперсности и формы цементита в перлите, получающегося после прокатки, изучали влияние не только температуры закалки, но и температуры конца их прокатки. Температура конца прокатки варьировалась в пределах $840 - 980^\circ\text{C}$, а температура закалки — в пределах $820 - 880^\circ\text{C}$. Проведенные испытания позволили выбрать оптимальную температуру закалки с точки зрения получения максимальной усталостной прочности и живучести рельсов, равную $850 - 860^\circ\text{C}$. Температура конца прокатки рельсов, подвергаемых объемной закалке и отпуску, не

оказывала заметного влияния на их усталостную прочность и живучесть. Холодная правка приводила к снижению предела выносливости закаленных рельсов, а дополнительный отпуск после правки заметно повышал предел выносливости за счет снятия остаточных напряжений растяжения. К сожалению, такая технология не была нигде реализована.

Получены важные экспериментальные данные о влиянии низких температур на сопротивление усталости рельсов [14] и широкие экспериментальные данные об изменении усталостной прочности в процессе эксплуатации на основе стендовых циклических испытаний более 7500 проб [12].

В табл. 2 приведены экспериментальные данные о значениях пределов выносливости рельсов типа Р65 различных категорий при испытаниях головкой и подошвой в зоне растяжения при коэффициенте асимметрии нагружения, равном 0,1.

Значительная масса погонного метра рельсов, определяющая высокие значения моментов сопротивления, и отработанное за долгие годы эксплуатации конструктивное оформление их поперечного сечения обеспечивают отсутствие образования в результате изгиба и кручения усталостных трещин в бездефектных рельсах. Усталостные трещины в подошве и шейке, где напряжения, возникающие в результате изгиба и кручения, имеют максимальные значения, могут образовываться только в местах каких-либо дефектов, возникших на металлургических заводах, при транспортировке, сварке, сверлении, разрезке или в процессе эксплуатации рельсов.

Типичным представителем последних являются электрокоррозионные повреждения подошвы. Эти повреждения возникают в результате электролиза при протекании тока утечки в местах неплотного контакта, при наличии влажных загрязнений между подошвой рельсов и деталями креплений. Чаще всего электрокоррозионные повреждения возникают в тоннелях на участках, электрифицированных на постоянном токе, и в метрополитенах. В результате

Таблица 2

Пределы выносливости рельсов различных категорий

Table 2

Fatigue strength of different categories

Категория рельсов	Испытание головкой в зоне растяжения		Испытание подошвой в зоне растяжения	
	Минимальное значение в технической документации	Типичные значения, МПа	Минимальное значение в технической документации	Типичные значения, МПа
Нетермоупрочненные рельсы НТ260, НТ300	≥ 300	310 – 330	—	290 – 310
Объемнозакаленные рельсы ОТ350, ОТ350НН, ОТ350СС	≥ 370	380 – 400	—	370 – 380
Дифференцированно-упрочненные рельсы ДТ350, ДТ350НН, ДТ350СС, ДТ350ВС	≥ 370	430 – 530	—	390 – 420

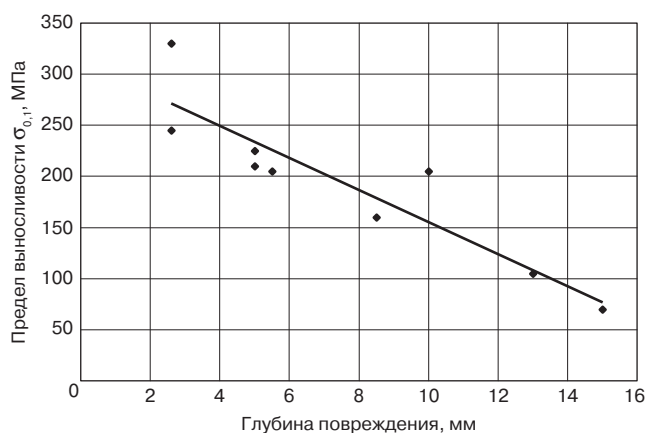


Рис. 1. Зависимость предела выносливости рельсов от глубины электрокоррозионных повреждений подошвы

Fig. 1. Dependence of fatigue strength of rails on the depth of electro corrosion damage in rail foot

развития электрокоррозии сроки службы и ресурсы рельсов в этих условиях эксплуатации сильно сокращаются [15]. При этом на кромках подошвы рельсов образуется местная выработка глубиной до 12–15 мм, форма которой зависит от типа скреплений и контакта между костылем или клеммой, с одной стороны, и подошвой рельса, с другой. Кроме того, в результате электрокоррозии происходит постепенное уменьшение толщины подошвы.

Электрокоррозионные повреждения кромок подошвы являются опасными концентраторами напряжений и могут служить источником образования усталостных трещин в пере подошвы. Опасность этого вида дефектов в рельсах увеличивается из-за того, что поперечная усталостная трещина, растущая в пере подошвы, не может быть выявлена средствами рельсовой дефектоскопии, пока она не дорастет до проекции шейки. Критический размер усталостной трещины в пере подошвы, как правило, не достигает 60–65 мм, что необходимо, чтобы трещина доросла до проекции шейки.

Проведенное исследование влияния вида и размеров электрокоррозионных повреждений кромок подошвы рельсов в тоннелях на их усталостную прочность [16] показало, что при поперечном изгибе рельсовых проб подошвой в зоне растяжения наблюдалось два вида усталостных разрушений. В одних случаях усталостная трещина начиналась в пере подошвы от электрокоррозионных повреждений, а в других случаях она возникала в средней части подошвы на нижней ее поверхности от коррозионных каверн глубиной 1,5–2 мм. При отсутствии каких-либо коррозионных повреждений подошвы усталостные трещины, как правило, возникали при испытаниях в средней ее части, где в рельсах имеются растягивающие остаточные напряжения в отличие от перьев подошвы, где обычно имеются сжимающие остаточные напряжения.

Характерно, что к образованию усталостных трещин в перьях подошвы при испытании рельсов на усталость приводили наиболее островрезанные и самые глубокие полуэллиптические электрокоррозионные повреждения кромок подошвы, образованные при костыльном скреплении. Наоборот, электрокоррозионные повреждения кромок подошвы, образованные при скреплениях, применяемых в метрополитенах и имеющих длинную, относительно более гладкую поверхность вдоль всей реборды подкладки, являлись менее острыми концентраторами напряжения, и развитие усталостной трещины в этих случаях началось в центральной части подошвы.

Определение пределов выносливости рельсов с электрокоррозионными повреждениями по методу Локати [16] показало, что с увеличением глубины повреждений кромки подошвы предел выносливости рельсов существенно понижался (рис. 1). Полученной зависимостью воспользовались для установления предельно допустимых норм дефектности рельсов с электрокоррозионными повреждениями. Поскольку этот вид повреждений легко выявляется при внешнем осмотре и не приводит к внезапному хрупкому разрушению рельсов, установили два предельных размера таких повреждений, при достижении которых рельсы относят сначала к дефектным (ДР), требующим замены в плановом порядке, а затем к остродефектным (ОДР), требующим немедленной замены. Эти размеры составили 5 мм для ДР и 8 мм для ОДР. Подобный подход может быть осуществлен по отношению к любым поверхностным дефектам в области подошвы и шейки рельсов, снижающим сопротивление рельсов усталости и по мере увеличения своих размеров переводящим рельсы сначала в категорию ДР, а затем и ОДР.

Усталостная прочность головок рельсов может существенно снижаться при термомеханических повреждениях поверхности катания. Термомеханические повреждения поверхности катания, возникающие в результате боксования и юза колес подвижного состава, приводят к существенному снижению пределов выносливости рельсов с 400 до 277–334 МПа [17]. При этом у тех рельсов, у которых у поверхности катания имелись остаточные напряжения растяжения, предел выносливости при образовании термомеханических повреждений снижался в большей степени. Опасность снижения ударной вязкости в современных рельсах при повышении их твердости с целью увеличения сопротивления контактной усталости и износу связана с тем, что при термомеханических повреждениях поверхности катания поперечные разрушения рельсов при высоких остаточных напряжениях растяжения могут происходить сразу по механизмам хрупкого разрушения без стадии образования и постепенного подрастания усталостной трещины.

Расчет циклической контактной прочности при недопущении в пределах ресурса (или регламентации вероятности) образования трещин контактной усталости в головке регламентированного вида и размера. Наиболее сложной проблемой является расчет долговечности рельсов, лимитируемой контактной усталостью. Такие расчеты являются весьма актуальными при переходе на массовое использование рельсов новых категорий (например, при переходе от объемнозакаленных рельсов к дифференцированно-термоупрочненным), при изменении условий эксплуатации (например, при увеличении осевых нагрузок), при корректировке сроков назначения ремонтов пути со сплошной сменой рельсов и в ряде других случаев. Эти расчеты являются основой для установления γ -процентного, гарантийного и нормативного ресурсов рельсов. Можно выделить два взаимно дополняющих направления расчета долговечности рельсов, лимитируемых контактной усталостью: расчет, опирающийся на испытания небольших лабораторных образцов [18], и расчет, позволяющий на основе результатов испытаний рельсов в одних условиях эксплуатации предсказывать их долговечность в других условиях эксплуатации [19].

В первом случае одной из основных проблем расчета является учет масштабного фактора. Влияние масштабного фактора на сопротивление контактной усталости изучали [20] на образцах диаметром 15, 40 и 50 мм из стали 75ХГСТ, термически обработанной на три уровня прочности (HRC 42, 47 и 51) при схеме испытания «цилиндр — цилиндр». Результаты испытаний показали, что с увеличением диаметра образца наблюдается рост сопротивления контактной усталости при всех изученных уровнях прочности.

Результаты лабораторных испытаний на контактную усталость использовали для оценки влияния увеличения уровня контактных напряжений при повышении осевых нагрузок на снижение долговечности. Для этого на двух уровнях напряжений, превышающих условный предел контактной выносливости для трех рельсовых сталей твердостью HB 250, 350 и 450, определили показатель степени m в формуле для расчета долговечности

$$N = N_0 \left(\frac{\sigma_K}{\sigma} \right)^m.$$

Значения показателя степени составили 7,7 – 9,5. С увеличением твердости показатели степени увеличивались, что свидетельствовало об интенсификации темпа снижения долговечности с увеличением контактной нагрузки.

Поскольку решающую роль в образовании и развитии контактно-усталостных трещин (дефект 11) играют касательные напряжения, сопоставление напряжений в образцах и рельсах для оценки масштабного фактора было осуществлено в касательных

напряжениях (рис. 2). Полученная зависимость касательных напряжений $\tau_{\max}$ от приведенной кривизны контактирующих тел имела линейный характер и была экстраполирована на приведенную кривизну пары колесо — рельс. Рассчитанные таким образом значения $\tau_{\max}$ для пары колесо — рельс равнялись 320 МПа для горячекатаных рельсов и 470 МПа — для термоупрочненных рельсов.

Для решения второй задачи можно использовать алгоритм и методику, разработанные А. Я. Коганом и А. Ю. Абдурашитовым [19]. Данная методика позволяет вычислить тоннаж брутто, который можно пропустить по заданному участку с заданными характеристиками, если известен тоннаж брутто, пропущенный по опытному участку, при котором был исчерпан ресурс контактно-усталостной прочности рельсов. Решения получены в вероятностной постановке задачи с учетом всего многообразия движущегося по участку пути подвижного состава с различными скоростями, различными непогашенными ускорениями и т. д. Предлагаемый алгоритм позволяет учитывать влияние на контактно-усталостную прочность рельсов интенсивности износа головки рельса, влияние шлифовки рельсов, кратность тяги, рекуперативное торможение и горно-перевальные условия с помощью соответствующих коэффициентов. С помощью коэффициентов учитываются также климатические условия. В числе учитываемых факторов — конструктивные параметры подвижного состава, параметры конструкции верхнего строения пути, параметры, характеризующие состояние пути в плане и профиле.

За меру повреждаемости рельсов контактно-усталостными дефектами в одном цикле нагружения (при проходе по рельсу одной оси экипажа) принята величина равнодействующей вертикальной и боковой нагрузок, передаваемых от колеса экипажа на рельс.

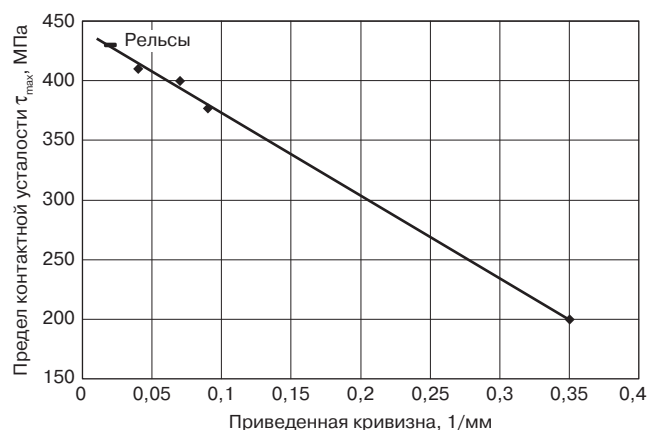


Рис. 2. Влияние масштабного фактора на предел контактной усталости рельсовой стали

Fig. 2. Influence of the scale factor on limit of contact fatigue of rail steel

Расчет живучести рельсов с учетом наличия усталостных трещин при недопущении полного хрупкого разрушения всего сечения. Этот расчет рельсов на живучесть должен позволить решить задачу прогнозирования остаточного ресурса рельсов с поперечной усталостной трещиной в головке. Практическим выходом из данного расчета должна стать корректировка периодичности дефектоскопирования рельсов в пути с учетом конкретных условий эксплуатации и всего регламента действий при обнаружении острodefектного рельса.

При этом расчет должен позволить решить две задачи: определить размер трещины в момент перехода от усталостного ее развития к квазихрупкому долому и предсказать продолжительность (наработку) от момента обнаружения поперечной трещины дефектоскопами до ее критического размера.

В ряде работ [21 – 33] с использованием положений линейной механики разрушения разрабатывались математические модели, которые позволяли количественно определить критерии, необходимые для прогнозирования живучести и оценки остаточной прочности острodefектных рельсов типа Р65 с конкретной геометрией внутренних поперечных трещин в головке, образовавшихся в эксплуатации. При этом определялись коэффициенты интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва в критической области перехода от усталостного развития трещины к квазихрупкому долому. Разработаны также функции, позволяющие аналитически определять коэффициенты интенсивности напряжений первого типа в острodefектных рельсах типа Р65 с геометрией поперечных трещин эксплуатационного происхождения, выходящих и не выходящих на поверхность головки рельса.

Научно обоснованная периодичность дефектоскопирования должна основываться на знании закономерностей роста различных усталостных трещин в рельсах. Эти закономерности достаточно сложны, но

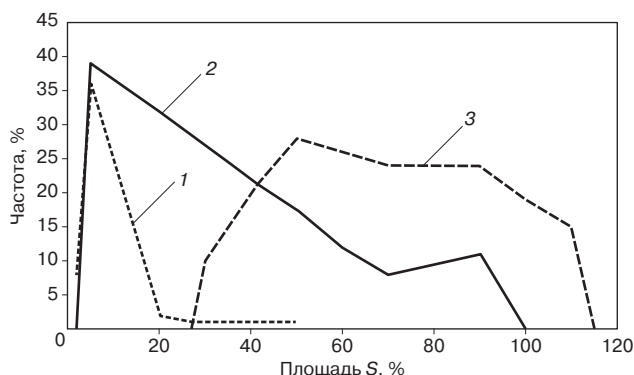


Рис. 3. Трещины, обнаруженные на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ (1), железной дороге (2) и приведшие к изломам (3)
Fig. 3. Cracks found in the Test Loop of VNIIZhT (1), railway (2) and leading to fractures (3)

в современной механике разрушения интенсивность развития усталостных трещин зависит от коэффициентов интенсивности напряжений у трещин, температуры и свойств металлической матрицы, определяемых параметрами ее циклической и статической трещиностойкости. Условия эксплуатации рельсов очень многообразны, что затрудняет их полный учет, а наблюдения за растущими трещинами в острodefектных рельсах в пути затруднены из-за риска излома рельса под колесами проходящего поезда. Поэтому, несмотря на то что современные средства дефектоскопии позволяют определять размеры и конфигурацию дефектов [34], экспериментальных данных о скорости роста трещин в рельсах, лежащих в пути, очень мало, и вряд ли можно рассчитывать на получение их в будущем [23]. Отсюда вытекает особая роль расчетов в оценке остаточного ресурса рельсов с трещинами. Основным средством получения экспериментальных данных о циклической трещиностойкости рельсовой стали и рельсов, что необходимо для верификации расчетов, остаются лабораторные и стендовые испытания, на основании которых можно будет убедиться в корректности расчетов.

В работах [35 – 37] испытано более 200 рельсовых проб длиной 1,2 м, вырезанных из рельсов, снятых с Экспериментального кольца ВНИИЖТ и с железных дорог, после обнаружения в их головках поперечных трещин при дефектоскопировании. Рельсовые пробы с поперечными трещинами в середине пробы испытывали на статический сосредоточенный изгиб головкой в зоне растяжения с расстоянием между опорами 1 м на прессе с записью диаграмм деформации.

На рис. 3 приведены три кривые распределения размеров поперечных усталостных трещин в головке рельсов: 1 — выявленных на Экспериментальном кольце, 2 — выявленных на одной из железных дорог и 3 — в изломах рельсов, произошедших в пути. Последняя кривая наиболее сильно сдвинута в область трещин большого размера. Средний размер усталостных трещин, своевременно не выявленных при дефектоскопировании и приведших к разрушению рельсов в пути, равен 70% поперечного сечения головки. Если сравнить полученное среднее значение площади поперечных трещин в рельсах, выявленных дефектоскопистами Экспериментального кольца ВНИИЖТ и выявленных на железных дорогах [36], то разница получается достаточно разительная: 10% поперечного сечения головки на Экспериментальном кольце и 20 – 30% — на железных дорогах.

Сравнение этих трех кривых распределения свидетельствует о том, что примерно половина рельсов с поперечными трещинами на железных дорогах находится в зоне риска, когда при неблагоприятном сочетании обстоятельств (низкая температура окружающего воздуха, ударное воздействие колес неисправных вагонов

с ползунами и овальностью) может произойти хрупкое разрушение рельса с поперечной трещиной в головке. На Экспериментальном кольце качество дефектоскопного контроля практически исключает хрупкое разрушение рельсов с растущими поперечными трещинами в головке.

Фиксация и мониторинг размеров поперечных трещин в головке, выявленных дефектоскопистами на данной железной дороге (участке, околотке, дистанции пути), могут служить объективной оценкой действующей там системы дефектоскопного контроля. То же относится и к объективному сравнению различных дефектоскопов. Естественно, для этого нужно выполнять требование нового НТД «Классификация дефектов рельсов» об обязательном доломе всех остродефектных рельсов.

Верификация разработанных моделей путем проведения испытаний на статический изгиб фрагментов рельсов с поперечными трещинами, образовавшимися при эксплуатации, и сопоставление результатов расчета с полученной базой экспериментальных данных по остаточной статической прочности рельсов показали достаточно хорошее их соответствие по средним значениям. В то же время пока расчеты не соответствуют большим разбросам экспериментальных данных для зависимости разрушающей нагрузки от площади внутренних поперечных усталостных трещин. Это имеет место даже в том случае, если из общей совокупности были удалены данные для наиболее крупных поперечных трещин, вышедших на поверхность рельса. Связано это с двумя факторами: большим разнообразием форм реальных трещин, развивающихся в рельсах при эксплуатации, и разной величиной остаточных напряжений, действующих в зонах развития поперечных трещин.

Если расчет на прочность рельсов в момент долома всеми исследователями достаточно обоснованно связывается с определением коэффициентов интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва первого типа, когда колесо находится не над трещиной, то при исследовании закономерностей развития усталостных трещин в рельсах такое единодушие отсутствует. Возможно, что в начальный период развития поперечных трещин от продольных при их повороте и небольших размерах поперечных трещин решающее влияние на скорость их развития оказывают коэффициенты интенсивности напряжений не только первого, но и второго типа. При этом поперечные трещины распространяются в момент нахождения над ними колес [22].

Пока разработаны методики прогнозирования продолжительности роста усталостных трещин в рельсах при стендовых испытаниях на циклический изгиб и в пути с определением наработки до критического размера трещины в эксплуатации в зависимости от

размаха коэффициентов интенсивности напряжений первого типа. Они основаны на построении кинетических диаграмм усталостного разрушения.

После проведения испытаний по определению скорости роста усталостных трещин при установленных значениях размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK , равных 10,0; 11,0; 12,5; 16,0; 18,0; 20,0; 22,0; 24,0 МПа·м^{1/2}, были построены графики зависимости средних значений скорости роста усталостной трещины от значений размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK при температурах плюс 20 и минус 60 °С и определены коэффициенты C_0 и n в уравнении Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta K)^n,$$

где $\frac{da}{dN}$ — скорость роста усталостных трещин; ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжений; n и C_0 — параметры, выражающие соответственно наклон кривой зависимости $\lg\left(\frac{da}{dN}\right)$ от $\lg(\Delta K)$ и отрезок по оси ординат.

Расчет живучести рельса с трещиной для получения прогнозных оценок числа циклов нагружения, наработки тоннажа и времени роста трещины выполняли как численное интегрирование уравнения Пэриса [30].

Для установления закономерностей развития поперечных усталостных трещин в головках рельсов нужны данные о начальных и конечных размерах трещины, о параметрах условий эксплуатации, о свойствах рельсовой стали. Исходя из параметров условий эксплуатации, необходимо сделать оценку сил, действующих на рельсы, выполнить расчет напряжений в рельсах и расчет коэффициентов интенсивности напряжений. На основе этих данных может быть проведен расчет остаточного ресурса (живучести) рельса с трещиной с получением прогнозных оценок числа циклов нагружения, наработки тоннажа и времени роста трещины.

Верификация прогнозирования живучести рельсов проводилась при стендовых испытаниях рельсов, пораженных дефектом 21 в средней стадии развития. Дефекты 21 возникали при полигонных испытаниях на Экспериментальном кольце или в действующем пути, рельсы изымали из пути и доиспытывали на усталость на гидропульсаторе. Получены обнадеживающие результаты, свидетельствующие о том, что наработка тоннажа от практически выявляемого до критического размера трещины в ряде условий эксплуатации составляет порядка 30 млн т груза брутто. Объединение подходов работ [19, 30] позволит уточнить расчеты и получить данные о продолжительности работы рельсов с поперечными усталостными трещинами в различных условиях эксплуатации.

Заключение. Действующие документы, касающиеся расчетов рельсов на прочность, устарели и требуют разработки новых. Это относится к документам, регламентирующим:

- правила расчетов циклической прочности при недопущении образования усталостных трещин в подошве и шейке;
- циклическую контактную прочность при недопущении в пределах ресурса (или регламентации вероятности) образования трещин контактной усталости в головке определенного вида и размера;
- живучесть рельсов с учетом наличия усталостных трещин при недопущении полного хрупкого разрушения всего сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вериге В.Ф., Крепкогорский С.С. Общие предпосылки для корректировки правил расчетов железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил // Динамические исследования пути и корректировка правил расчетов железнодорожного пути на прочность: сб. трудов ученых ЦНИИ МПС. Вып. 466. М.: Транспорт, 1972. С. 1–50.
2. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность. М.: ЦНИИ МПС, 1954. 60 с.
3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
4. Мейснер Б.А. Прочность и надежность рам локомотивных тележек (оценка и прогнозирование): автореф. дисс. докт. техн. наук: специальность 05.22.07. М.: ЦНИИ МПС, 1973. 43 с.
5. Шур Е.А. О выборе допускаемых напряжений при прочностных расчетах рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1977. № 8. С. 38–41.
6. Ромен Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее // Методы расчета и испытаний: труды ОАО «ВНИИЖТ». М.: ВМГ-Принт, 2014. 210 с.
7. Сравнительные испытания по воздействию на путь и стрелочные переводы вагонов новых конструкций с различными осевыми нагрузками / О.А. Сулов [и др.] // Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути: сб. трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ». М.: ВМГ-Принт, 2014. С. 73–82.
8. Смирнова М.Б. Установление коэффициента асимметрии цикла по экспериментальным данным: труды МИИТ. Вып. 271. М.: Транспорт, 1968. С. 118–119.
9. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. 12 с.
10. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. М.: МПС РФ, 2000. 38 с.
11. Шур Е.А., Грачева Л.Ф. Влияние режима периодического нагружения на циклическую прочность рельсовой стали // Вестник ВНИИЖТ. 1975. № 2. С. 43–45.
12. Шахунянц Г.М., Туровский И.Я., Смирнова М.Б. Механические характеристики рельсов Р65 стандартного производства: труды МИИТ. № 271. М.: Транспорт, 1968. С. 3–104.
13. Лошкина Н.А., Шур Е.А., Раузин Я.Р. Усталостная прочность и живучесть объемно закаленных рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1970. № 6. С. 32–35.
14. Влияние низких температур на сопротивление усталости рельсов / В.И. Шахов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1989. № 1. С. 47–50.
15. Глонти А.Н. Причины электрокоррозии рельсов и креплений в тоннелях // Путь и путевое хозяйство. 1970. № 11. С. 29–30.
16. Шур Е.А., Глонти А.Н., Бычкова Н.Я. Усталостная прочность рельсов с электрокоррозионными повреждениями // Вестник ВНИИЖТ. 1974. № 8. С. 26–29.
17. Шур Е.А., Порошин В.Л. Повышение прочности закаленных рельсов с термомеханическими повреждениями // Вестник ВНИИЖТ. 1975. № 7. С. 48–51.
18. Методические указания «Надежность в технике. Методы испытаний на контактную усталость». М.: Изд-во стандартов, 1974. 52 с.
19. Коган А.Я., Абдурашитов А.Ю. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 4. С. 3–7.
20. Шур Е.А., Бычкова Н.Я. Влияние масштабного фактора на сопротивление контактной усталости и прогнозирование долговечности рельсов по результатам лабораторных испытаний // Расчеты и испытания на контактную усталость материалов и деталей машин: сб. трудов ВНИИММаш. М.: ВНИИММаш, 1984. С. 145–149.
21. Cannon D.F., Allen R.I. The application of fracture mechanics to railway failures—REI, 1974, v.3, № 4, pp. 6–17. Discuss. 17–23.
22. Цвигун В.Н. Исследование вязкости разрушения рельсовой стали и механизма контактно-усталостных дефектов рельсов: автореф. дисс. канд. техн. наук: специальность 05.16.01. М., 1980. 17 с.
23. Порошин В.Л. Влияние эксплуатационных факторов на скорость развития поперечных трещин в головке рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1980. № 4. С. 45–47.
24. Edel K.O. Bruchmechanische Grundlagen für die Ermittlung der Kritischen Grosse von Querrissen in Eisenbahnschienen. Die Eisenbahntechnik. 1981. Bd. 29. № 11. S. 448–451.
25. Прочность рельсов с трещинами / Е.А. Шур [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1982. № 4. С. 48–52.
26. О механизме развития контактно-усталостных трещин в железнодорожных рельсах / М.Н. Георгиев [и др.] // Заводская лаборатория. 2000. Т. 66. № 9. С. 50–52.
27. Коган А.Я., Абдурашитов А.Ю. Особенности расчета на прочность рельсов с трещинами // Повышение надежности работы пути: труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2001. С. 21–32.
28. Суровин П.Г., Тихомиров В.М. Исследование направления развития контактно-усталостных трещин в рельсах Р65 // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. Колесо-рельс: сборник докладов конференции. М.: Интекст, 2003. С. 181–183.
29. Sandström J., Ekberg A. Predicting Crack Growth and Risks of Rail Breaks due to Wheelflat Impacts in Heavy Haul Operations. Chalmers University of Technology. International Heavy Haul Conference Specialist Technical Session Kiruna, Sweden June 11–13, 2007, pp. 379–388.
30. Шур Е.А., Коган А.Г., Коган А.Я. Прогнозирование остаточного ресурса рельсов с поперечными трещинами // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений: сб. трудов. Екатеринбург, 2009. С. 169–181.
31. Горбунов М.А. Оценка напряженного состояния в окрестности трещин при эксплуатации рельсов: дисс. канд. техн. наук: специальность 05.22.06. М., 2011. 182 с.
32. Применение линейной механики разрушения / А.Я. Коган [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 2. С. 25–27.
33. Изучение механизмов питтинга, споллинга и других контактно-усталостных дефектов в рельсах. Ч. 5. Классификация контактно-усталостных повреждений железнодорожных рельсов / В.Н. Цвигун [и др.] // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: сборник научных трудов. Вып. 35 / Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. С. 147–173.
34. Мосягин В.В., Марков А.А. Оценка реальных размеров дефектов в изделиях с двусторонним доступом // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 4. С. 11–14.

35. Дьяконов В.Н., Шур Е.А., Колотушкин С.А. Оценка свойств рельсов с контактно-усталостными повреждениями // Вестник ВНИИЖТ. 1969. № 6. С. 11 – 16.

36. Прочность рельсов с внутренней поперечной трещиной в головке / Е.А. Шур [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений: сборник трудов. Новокузнецк, 2013. С. 101 – 117.

37. Рейхарт В.А. Статическая прочность рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 7. С. 2 – 6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ШУР Евгений Авелевич,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Материалы и технологии термической обработки деталей верхнего строения пути и подвижного состава», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 20.03.2016 г., принята к публикации 9.06.2016 г.

On improvement of calculations for strength of rails

E.A. SHUR

Joint Stock Company "Railway research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. From the middle of the last century, beginning with the works of Professor M.F. Verigo, rejection of yield strength at static loading and transition to the fatigue strength under cyclic loading were accepted and made as the main conceptual provisions in calculations of rails for strength when choosing allowable stress levels. Thus, calculation of rails for the strength should be carried out as all strength calculations of machine parts under loadings, variable in time. Further progress in the development of methods for calculating the strength of rails under varying stresses correspond with the implementation in practice of calculations of probability concepts.

In article three types of calculations of rails for strength, having the greatest practical value now, are considered namely: calculation of cyclic strength of rails at prevention of formation of fatigue cracks in a foot and a neck; calculation of cyclic contact strength at prevention within a resource (or probability regulations) of formations of cracks of contact fatigue in a head of regulated shape and size, and also calculation of durability of rails taking into account existence of fatigue cracks at prevention of complete brittle fracture of all section. The main attention is paid to determination of allowable stresses when calculating cyclic strength, as well as to the accounting of a large-scale factor when calculating cyclic contact strength, and also to determination of duration of development of fatigue cracks and their critical size when calculating durability. The existing normative documents concerning calculations of rails on strength have become outdated and demand development of new ones.

Keywords: rails; calculations for strength; fatigue; contact fatigue; durability

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-207-216>

REFERENCES

1. Verigo V.F., Krepkogorskiy S.S. *Obshchie predposylki dlya korrektyrovki pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' i predlozheniya po izmeneniyu etikh pravil* [General preconditions for the adjustment of the rules for calculations of strength of railway track and proposals to amend the rules]. *Dinamicheskie issledovaniya puti i korrektyrovka pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost'*. Sb. trudov uchenykh TsNII MPS. [Dynamic studies of tracks and correcting of rules for calculations of strength of railway track. Collection of works of the scientists of Central Research Institute of Ministry of Railway Transport]. Moscow, Transport Publ., 1972, Vyp. 466, pp. 1 – 50.

2. *Pravila proizvodstva raschetov verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti na prochnost'* [Terms of production of calculations of strength of railway track superstructure]. Moscow,

TsNII MPS [Central Research Institute of Ministry of Railway Transport] Publ., 1954, 60 p.

3. Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Calculations of strength at stresses that variable in time]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 364 p.

4. Meysner B.A. *Prochnost' i nadezhnost' ram lokomotivnykh telezhek (otsenka i prognozirovaniye)*. Dokt. tekhn. nauk avtoref. diss. [Strength and reliability of locomotive bogie frames (assessment and forecasting). Dr. techn. sci. Synopsis diss.]. Moscow, TsNII MPS Publ., 1973, 43 p.

5. Shur E.A. *O vybere dopuskaemykh napryazheniy pri prochnostnykh raschetakh rel'sov* [On the choice of permissible stresses in strength calculations of rails]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1977, no. 8, pp. 38 – 41.

6. Romen Yu.S. *Dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha v rel'sovoy kolee. Metody rascheta i ispytaniy* [Railway vehicle dynamics in railway gauge. Methods for calculation and tests]. Moscow, VMG-Print Publ., 2014, 210 p.

7. Suslov O.A., Kazhaev A.N., Borisov A.I., Tokareva A.E., Peregodova M.V., Novikov I.V., Skvoznayakov P.E. *Sravnitel'nye ispytaniya po vozdeystviyu na put' i strelochnye perevody vagonov novykh konstruktsiy s razlichnymi osevyimi nagruzkami* [Comparative tests on the effects on track and turnouts by cars of new designs with different axial loads]. *Povyshenie effektivnosti ustroystva i soderzhaniya zheleznodorozhnogo puti* [Improving the efficiency of organization and maintenance of railway tracks]. Sb. trudov uchenykh JSC "VNIIZhT". [Proc. of the scientists of JSC "VNIIZhT"]. Moscow VMG-Print Publ., 2014, pp. 73 – 82.

8. Smirnova M.B. *Ustanovlenie koeffitsienta asimmetrii tsikla po eksperimental'nym dannym* [Establishment of the stress ratios based on experimental data]. *trudy MIIT*. [Proceedings of MIIT]. Moscow, Transport Publ., 1968, Vyp. 271, pp. 118 – 119.

9. GOST R 55050 – 2012 *Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 12 p. (in Russ.).

10. *Methodology to evaluate the impact of the rolling stock on the track on the conditions to ensure its reliability*. Moscow, MPS RF Publ., 2000, 38 p. (in Russ.).

11. Shur E.A., Gracheva L.F. *Vliyanie rezhima periodicheskogo nagruzheniya na tsiklicheskuyu prochnost' rel'sovoy stali* [Effect of mode of periodic cyclic loading on the strength of the rail steel]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1975, no. 2, pp. 43 – 45.

12. Shakhunyan G.M., Turovskiy I. Ya, Smirnova M.B. *Mekhanicheskie kharakteristiki rel'sov R65 standartnogo proizvodstva* [Mechanical properties of rails R65 of standard production]. *Trudy MIIT*. [Proc. of MIIT]. Moscow, Transport Publ., 1968, no. 271 pp. 3 – 104.

13. Loshkina N.A., Shur E.A., Rauzin Ya.R. *Ustalostnaya prochnost' i zhivuchest' ob'emno zakalennykh rel'sov* [Fatigue strength

■ E-mail: shurea@mail.ru (E.A. Shur)

and vitality of bulk (comprehensive) hardened rails]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1970, no. 6, pp. 32 – 35.

14. Shakhov V.I., D'yakonov V. N., Reykhart V.A., Kaportsev V.N. *Vliyanie nizkikh temperatur na soprotivlenie ustalosti rel'sov* [The effect of low temperatures on fatigue resistance of the rails]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1989, no. 1, pp. 47 – 50.

15. Glonti A.N. *Prichiny elektrokorrozii rel'sov i skreplenyi v tonnelyakh* [Causes of galvanic corrosion of rails and fastenings in tunnels]. Put'i putevye khozyaystvo [Tracks and track facilities], 1970, no. 11, pp. 29 – 30.

16. Shur E.A., Glonti A.N., Bychkova N.Ya. *Ustalostnaya prochnost' rel'sov s elektrokorroziionnymi povrezhdeniyami* [Fatigue strength of rails with electro corrosion damages]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1974, no. 8, pp. 26 – 29.

17. Shur E.A., Poroshin V.L. *Povyshenie prochnosti zakalennykh rel'sov s termomekhanicheskimi povrezhdeniyami* [Increasing the strength of hardened rails with thermo mechanical damage]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1975, no. 7, pp. 48 – 51.

18. *Methodical instructions "Reliability in mechanical engineering. Test methods for contact fatigue"*, Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1974, 52 p. (in Russ.).

19. Kogan A. Ya., Abdurashitov A. Yu. *Prognostirovanie otkazov rel'sov po defektam kontaktno-ustalostnogo proiskhozhdeniya* [Prediction of failures of rails by defects of contact-fatigue origin]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 4, pp. 3 – 7.

20. Shur E.A., Bychkova N.Ya. *Vliyanie masshtabnogo faktora na soprotivlenie kontaktnoy ustalosti i prognostirovanie dolgovechnosti rel'sov po rezul'tatam laboratornykh ispytaniy* [Effect of the scale factor on the resistance of the contact fatigue and durability prediction of rails by laboratory test results]. Raschety i ispytaniya na kontaktnuyu ustalost' materialov i detaley mashin [Calculations and tests on the contact fatigue of materials and machine parts]. Sb. trudov VNIINMASH. [Proc. of VNIINMASH]. Moscow, VNIINMASH Publ., 1984, pp. 145 – 149.

21. Cannon D.F., Allen R.I. *The application of fracture mechanics to railway failures — REI*. 1974, Vol. 3, no. 4, pp. 6 – 17. Discuss. 17 – 23.

22. Tsvigun V.N. *Issledovanie vyazkosti razrusheniya rel'sovoy stali i mekhanizma kontaktno-ustalostnykh defektov rel'sov*. Kand. tekhn. nauk avtoref. diss. [Investigation of fracture toughness of rail steel and mechanisms of contact fatigue of rails defects. Cand. tehn. sci. synopsis diss.]. Moscow, 1980, 17 p.

23. Poroshin V.L. *Vliyanie ekspluatatsionnykh faktorov na skorost' razvitiya poperechnykh treshchin v golovke rel'sov* [Influence of operational factors on the rate of growth of transverse cracks in rail head]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1980, no. 4, pp. 45 – 4.

24. Edel K. O. *Bruchmechanische Grundlagen für die Ermittlung der Kritischen Grosse von Querrissen in Eisenbahnschienen*. Die Eisenbahntechnik. 1981. Bd. 29. no. 11. pp. 448 – 451.

25. Shur E.A., Kisileva T.N., Poroshin V.L., Beyzerov M.S. *Prochnost' rel'sov s treshchinami* [Strength of rails with cracks]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1982, no. 4, pp. 48 – 52.

26. Georgiev M.N., Mezheva N.Ya., Morozov E.M., Reykhart V.A. *O mekhanizme razvitiya kontaktno-ustalostnykh treshchin v zheleznodorozhnykh rel'sakh* [On the mechanism of contact fatigue cracks in rails]. Zavodskaya laboratoriya [Factory laboratory], 2000, Vol. 66, no. 9, pp. 50 – 52.

27. Kogan A. Ya., Abdurashitov A. Yu. *Osobennosti rascheta na prochnost' rel'sov s treshchinami* [Features of calculations on the strength of rails with cracks]. Povyshenie nadezhnosti raboty puti [Increasing reliability of track performance]. Trudy VNIIZhT. [Proc. of the Railway Research Institute]. Moscow, Intext Publ., 2001, pp. 21 – 32.

28. Surovin P.G., Tikhomirov V.M. *Issledovanie napravleniya razvitiya kontaktno-ustalostnykh treshchin v rel'sakh R65* [Study on directions of propagation of contact fatigue cracks in the R65 rails]. Sovremennye problemy vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i puti. Koleso-rel's. Sbornik dokladov konferentsii [Modern problems of interaction of rolling stock and track. Wheel-rail system. Collection of the conference papers]. Moscow, Intext Publ., 2003, pp. 181 – 18.

29. Sandström J., Ekberg A. *Predicting Crack Growth and Risks of Rail Breaks due to Wheelflat Impacts in Heavy Haul Operations*. Chalmers University of Technology. International Heavy Haul Conference Specialist Technical Session Kiruna, Sweden June 11 – 13, 2007, pp. 379 – 388.

30. Shur A. E., Kogan A. G., Kogan A. Ya. *Prognostirovanie ostatochnogo resursa rel'sov s poperechnymi treshchinami* [Prediction of residual life of rails with transverse cracks], Uluchshenie kachestva i usloviy ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenyi. sb. trudov [Improving the quality and operating conditions of rails and rail fasteners. collection of works]. Ekaterinburg, 2009, pp. 169 – 181.

31. Gorbunov M.A. *Otsenka napryazhennogo sostoyaniya v okrestnosti treshchin pri ekspluatatsii rel'sov*. Kand. tekhn. nauk diss [Evaluation of the stress state in the area of cracks in the operation of rails. Cand. tehn. sci. diss.]. Moscow, 2011, 182 p.

32. Kogan A. Ya., Shur E.A., Abdurashitov A. Yu., Gorbunov M.A. *Primenenie lineynoy mekhaniki razrusheniya* [The use of linear fracture mechanics]. Put' i putevye khozyaystvo [Tracks and track facilities], 2011, no. 2, pp. 25 – 27.

33. Tsvigun V.N., Shur E.A., Koynov R.S., Konovalov S.V. *Izucheniye mekhanizmov pittinga, spollinga i drugikh kontaktno-ustalostnykh defektov v rel'sakh. Ch. 5. Klassifikatsiya kontaktno-ustalostnykh povrezhdeniy zheleznodorozhnykh rel'sov* [The study on pitting, spalling and other contact-fatigue defects in the rails. Ch 5. Classification of contact fatigue damage of rails]. Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekti Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Otdeleniye metallurgii [Journal of Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy]. Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Izdatel'skiy tsentr SibGIU Publ., 2015, Vol. 35, pp. 147 – 173.

34. Mosyagin V.V., Markov A.A. *Otsenka real'nykh razmerov defektov v izdeliyakh s dvustoronnim dostupom* [Estimation of the real dimensions of defects in products with double-sided access]. V mire nerazrushayushchego kontrolya [In the world of non-destructive testing], 2014, no. 4, pp. 11 – 14.

35. D'yakonov V. N., Shur E.A., Kolotushkin S.A. *Otsenka svoystv rel'sov s kontaktno-ustalostnymi povrezhdeniyami* [Evaluation of the properties of rails with contact-fatigue damage], Vestnik VNIIZhT [Vestnik of Railway Research Institute], 1969, no. 6, pp. 11 – 16.

36. Shur E.A., Borts A.I., Reykhart V.A., Bazanova L.V. *Prochnost' rel'sov s vnutrenney poperechnoy treshchinoy v golovke* [Strength of rails with inner transverse crack in the head], Uluchshenie kachestva i usloviy ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenyi. Sbornik trudov. [Improving the quality and operating conditions of rails and rail fasteners. Collection of works]. Novokuznetsk, 2013, pp. 101 – 117.

37. Reykhart V.A. *Staticheskaya prochnost' rel'sov* [Static strength of rails]. Put' i putevye khozyaystvo [Tracks and track facilities], 2014, no. 7, pp. 2 – 6.

ABOUT THE AUTHOR

SHUR Evgeniy Avelevich,

Dr. Sci.(Eng.), Professor, Chief Researcher of the Laboratory "Materials and technologies for thermal processing of elements of track superstructure and rolling stock", JSC "VNIIZhT"

Received 20.03.2016

Accepted 9.06.2016