

Динамический анализ напряжений и оценка срока службы рельсов звеньевое пути

Долговечность рельсов звеньевое пути зависит главным образом от трещин усталостного происхождения в стыках. Известны различные типы изломов с трещинами, развивающимися от болтовых отверстий. По мере отмечаемого в последние годы облегчения подвижного состава число изломов уменьшается, что дает основание надеяться на удлинение интервалов между заменами рельсов. Чтобы выяснить распределение напряжений вокруг болтовых отверстий, выполнены статические нагружения, анализ статических и динамических напряжений, а также усталостные испытания, в том числе изгибные, как новых, так и старогонных рельсов звеньевое пути для оценки их срока службы.

Напряжения в рельсах звеньевое пути

Соответствующие измерения выполнялись на прямом участке пути метровой колеи с рельсами массой 50 кг/м, уложенными на деревянных шпалах в зоне стыков (пять шпал на стык) и на железобетонных на остальных участках по эюре 39 шпал на 25 м. Жесткость рельсовых подкладок составляла 110 МН/м, момент затяжки стыковых болтов — 500 Н·м. Для создания и исследования ровных стыков рельсы разрезали на две части, сверлили болтовые отверстия и собирали стыки так, чтобы на поверхности катания не оставалось никаких неровностей. Для создания стыков с искусственной неровностью, равной 1 мм по вертикали, между подкладкой и подошвой рельса вставляли тонкие прокладки.

Места измерения напряжений показаны на рис. 1. Напряжения измерялись у кромки болтовых отверстий и на расстоянии 5 мм от них под углом 45 град к продольной оси рельса в двух местах по обе стороны отверстия с использованием одноосных тензодатчиков. Причина необходимости выполнения из-

мерений на указанном удалении от отверстий заключалась в том, что при измерениях непосредствен-

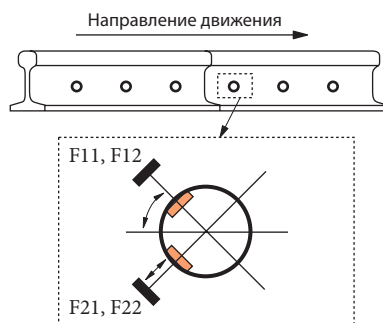


Рис. 1. Схема измерений напряжений в рельсах

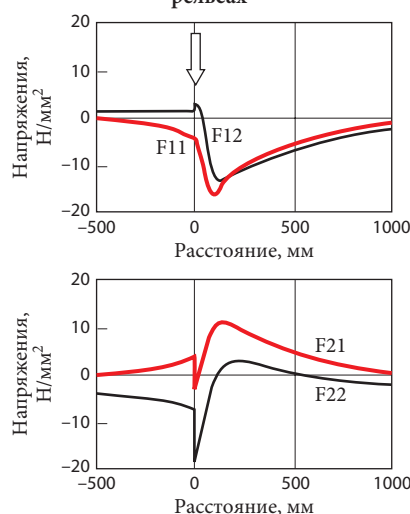


Рис. 2. Изменения напряжений в зоне болтового отверстия (гладкий стык на жесткой опоре)

но у кромки мог иметь место контакт датчиков с болтовыми отверстиями, что в свою очередь могло привести к ошибочности показаний. Результаты измерений у кромки отверстий обозначены как Н1 и Н2, измерений на расстоянии — F11, F12 с одной стороны (среднее значение измеренных величин обозначено как F1) и F21, F22 с другой стороны отверстия (среднее значение — F2).

Первый цикл испытаний

Чтобы подтвердить основные характеристики напряженного состояния рельсов у болтовых отверстий под нагрузкой при существующем подрельсовом основании, были проведены экспериментальные пробеги железнодорожного экипажа по данному участку. Для полноты картины под деревянными шпалами поместили монолитные бетонные опоры, как упругие (с промежуточными резиновыми матами жесткостью 70 МН/м между опорами и шпалами), так и жесткие (без таких матов).

Результаты измерений напряжений в зоне болтовых отверстий при скорости движения экипажа 5 км/ч над жесткой опорой и без неровностей в стыке показаны на рис. 2. Напряжения, возникшие при затяжке стыковых болтов, определены как нулевые (используемые в качестве точки отсчета). После прохода экипажем стыкового зазора напряжения F11 и F12 быстро снизились. Значения напряжений F11 и F12, так же как F21 и F22, имели отрицательные и положительные всплески около стыков. Эти характери-

стики согласуются с результатами предварительных статических испытаний и анализа.

На рис. 3 показаны результаты измерений максимальных и минимальных напряжений при проходе экипажа по стыку с неровностью на упругой опоре. Видно, что амплитуды напряжений растут по мере повышения скорости. Отрицательное пиковое значение Н2 и положительное пиковое значение Н1 вызваны ударной нагрузкой от колеса на стык вследствие наличия «ступеньки», так что в условиях стыков с неровностями динамические нагрузки от подвижного состава на путь возрастают.

Второй цикл испытаний

Для выяснения зависимости между ударной нагрузкой от колес на стык и разбросом напряжений были проведены также экспериментальные пробеги экипажа с измерениями колесных нагрузок и поперечных сил во взаимодействии колес и рельсов.

В данном случае путь метровой колеи с рельсами 50 кг/м на балласте был уложен на опытном участке в кривой радиусом 500 м с возвышением наружного рельса 55 мм. Измерения выполнялись в одном из стыков внутреннего рельса. При испытаниях использовали вагон электропоезда серии 103, эксплуатируемого в местных сообщениях, в груженом и порожнем состоянии. Скорость движения экипажа изменяли от 10 до 70 км/ч с шагом 10 км/ч.

Отношение поперечной силы к вертикальной нагрузке от колеса составило 0,02–0,12, что относительно невелико, поэтому изменения напряжений анализировали относительно нагрузки. При измерениях использовали фильтр нижних частот на 100 Гц. На рис. 4 отображена зависимость между ударной нагрузкой от колеса и амплитудами напряжений. Здесь значение $F1_{min}$ представляет усреднение минимальных значений напряжений $F11$ и $F12$; $F2_{max}$ и $F2_{min}$ — усредне-

ние максимальных и минимальных значений напряжений $F21$ и $F22$ соответственно. Сплошные линии на рисунке отражают регрессию. $F2_{min}$ согласуется с нагрузкой от колеса, а $F1_{min}$ и $F2_{max}$ не согласуются, поскольку ударная нагрузка от колеса на рельс обуславливает крайние значения напряжений в точке, несколько удаленной от стыкового зазора, как показано на рис. 2.

Третий цикл испытаний

Затем были проведены испытания рельсов массой 60 кг/м, уложенных в прямом участке пути метровой колеи на балласте, с воссозданием эксплуатационных условий трех видов, соответствующих нормальному пути, пути с провисшими шпалами и пути с изношенными стыковыми накладками. В ходе испытаний были совершены пробеги поездов скорых, местных пассажирских и грузовых. Случай пути с провисшими шпалами с зазором 3 мм между шпалой и балластом имитировали укладкой металлических пластинок между рельсами и шпалами в зоне стыков. Износ стыковых накладок создавали искусственно, выполняя вырезы величиной 1 мм в их нижних краях и посередине сверху.

С помощью множественного регрессионного анализа прояс-

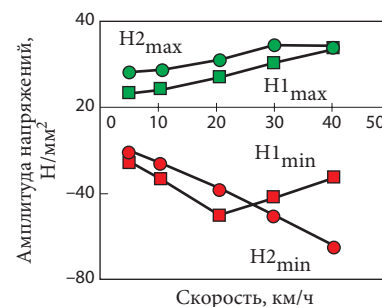


Рис. 3. Амплитуды напряжений в зоне болтового отверстия (стык с неровностью на упругой опоре)

нили влияние скорости движения экипажа, нагрузки от колеса и поперечной силы на амплитуды измеренных напряжений для каждой из указанных ситуаций, подставляя усредненные параметры в уравнение множественной регрессии и вычисляя амплитуды напряжений. Результаты приведены на рис. 5, а. Амплитуды напряжений в зоне болтовых отверстий измеряли в момент прохода локомотивов.

Широкий диапазон отрицательных напряжений относится к Н1, F11 и F12, а положительных — к Н2, F21 и F22. Максимальные напряжения составили 113 Н/мм² в точке Н1 и 125 Н/мм² в точке Н2 (при проходе локомотива). Соотношение между значениями напряжений у кромки болтового отверстия и на удалении 5 мм под углом 45 град оказалось меньше 3,0. Результаты испытаний подтвердили

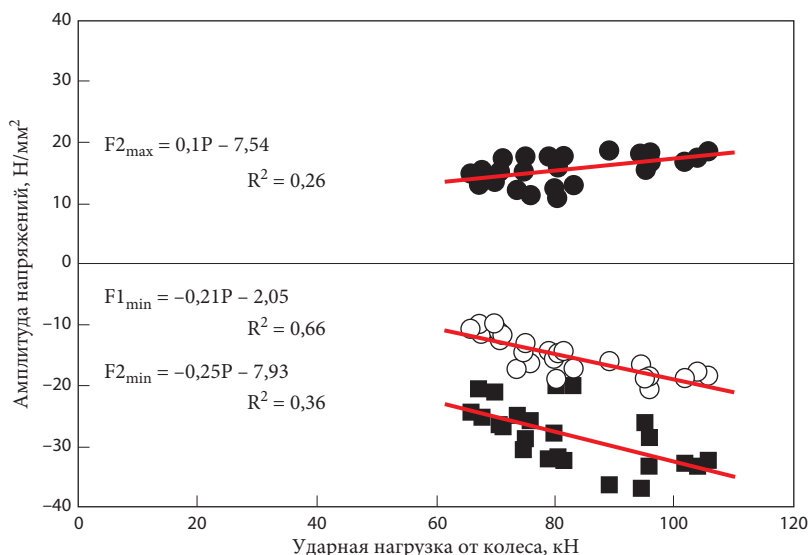


Рис. 4. Взаимоотношение между ударной нагрузкой и амплитудами напряжений

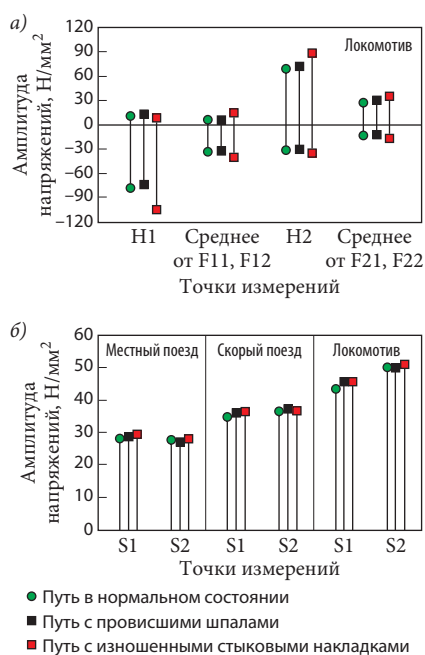


Рис. 5. Результаты испытаний рельса массой 60 кг/м:

а — амплитуды напряжений в зоне болтового отверстия; б — изгибные напряжения

ранее выполненные оценки этого показателя.

Напряжения изгиба в заднем по направлению движения рельсе стыка, измеренные на расстоянии 280 мм от конца рельса, обозначены как S1 (с внутренней стороны рельса) и S2 (с наружной стороны). Они оказались больше при проходе местных поездов, скорых и локомотивов, как показано на рис. 5, б. Максимальная величина напряжений составила 51 Н/мм² при проходе локомотива в случае пути с изношенными стыковыми накладками.

Четвертый цикл испытаний

Испытания под статической нагрузкой, выполненные на рельсе с девятью шпалами, были проведены с целью уяснения влияния поперечных сил на величину напряжений. Шпалы уложили на жесткое основание, прижали анкерными болтами и поместили балластные маты жесткостью 30 МН/м между шпалами и основанием. Рельс подвергли статической нагрузке в точках на удалении 30 мм от стыка, а угол нагружения регулировали для обеспечения predetermined соотношения поперечной и вертикальной сил.

Зависимость между соотношением поперечной и постоянной вертикальной сил и разброс значений напряжений с внутренней и наружной стороны рельса относительно их средних величин показаны на рис. 6. Разброс усредненных амплитуд напряжений при вертикальной нагрузке 75 кН достаточно слабо изменяется в зависимости от поперечной нагрузки. Вероятно, этот показатель зависит преимущественно от вертикальной нагрузки, а различия между амплитудами напряжений с внутренней и наружной стороны рельса обусловлены поперечной силой. Амплитуды напряжений F21 и F22 вблизи точки нагружения имеют тенденцию к увеличению по мере роста вертикальной нагрузки.

Разработка аналитической модели динамических напряжений

С целью оценки напряжений в рельсах в зоне стыка сформированы аналитические модели динамических напряжений — в виде балки для расчета динамической силы и объемная для расчета напряжений от этой силы. Модель проверена по результатам экспериментов; расчетные точки приняты те же, что на рис. 1.

На рис. 7 отображен весь комплекс моделирования, включающий модель взаимодействия экипажа и пути и модель для расчетов по методу конечных элементов. В балочной модели рельс представлен в виде балки Тимошенко (Timoshenko), шпалы — в виде сосредоточенных масс; введены упругие и демпфирующие элементы между рельсами и шпалами, а также между шпалами и фиксированными точками. Стыковые накладки смоделированы в виде балочных элементов, упруго связанных с рельсами, экипаж смоделирован как половина кузова вагона. В данной модели может быть учтена прерывность рельса в стыке. Коэффициент упругости между рельсом и стыковой накладкой, составленной из восьми элементов, определен на уровне 10 ГН/м на основе сопоставления результатов статического анализа с данными эксперимента.

Объемная модель состояла из рельса с полушпалами. Для отображения концентрации напряжений вокруг болтовых отверстий использованы сетки с малым шагом. В анализе сначала использована вся объемная модель, а затем модель с мелкой сеткой вокруг болтовых отверстий, граничные условия для которой получены по оценкам смещения из предшествующего анализа, выполненного с помощью пакета программ NASTRAN FEM.

Адекватность модели подтверждена результатами экспериментов с пропуском экипажа через стык с вертикальной ступенькой. На рис. 8 приведено сопоставление значе-

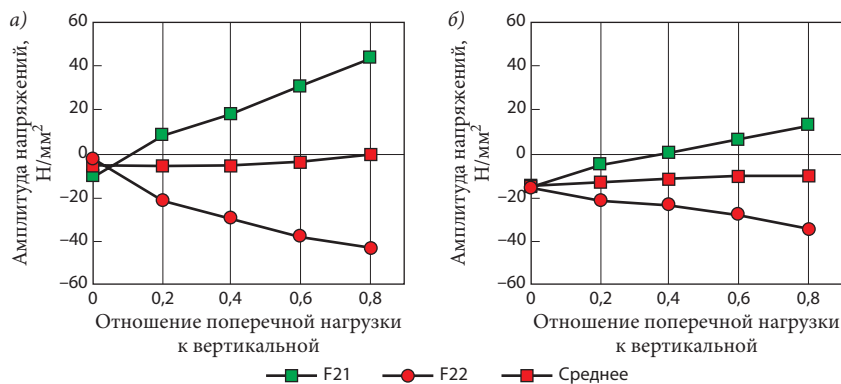


Рис. 6. Амплитуды напряжений в зависимости от поперечной нагрузки при вертикальной нагрузке 75 кН:

а — для рельса массой 50 кг/м; б — для рельса массой 60 кг/м

ний сил у подошвы рельса, полученных расчетным путем и в эксперименте. Несмотря на то что расчетная пиковая величина от воздействия ударной нагрузки острее, чем в экспериментах, картина разбросов, полученная в результате расчетов, аналогична полученной в экспериментах при скорости движения экипажа 10 и 40 км/ч.

Расчетные напряжения вокруг болтового отверстия при скорости 40 км/ч колеблются возле пикового значения под действием ударной нагрузки. Расчетные максимумы напряжений в точках у кромки отверстия и на удалении 5 мм хорошо согласуются с полученными в экспериментах.

Таким образом, аналитическая модель динамических напряжений позволяет приближенно прогнозировать изменение напряжений в звеньевом пути. Однако расчетные динамические силы зачастую оказываются ниже фактических в случае ступенчатого стыка с пониженным задним рельсом.

Усталостные испытания на изгиб старогодных рельсов из звеньевом пути

Усталостным испытаниям на изгиб был подвергнут старогодный рельс из звеньевом пути, пропустивший суммарную поездную нагрузку примерно 330 млн. т брутто. В ходе испытаний на вибрационном стенде зафиксировано возникновение трещин по кромке болтовых отверстий и их распространение под углом 45 град с последующим изломом рельса.

По результатам испытаний с использованием весового анализа по Пробиту (Probit) для малых выборок усталостных данных построена кривая S/N (N — число циклов нагружения, $S = -146 \log N + 1407$), отражающая с вероятностью 50% остаточный срок службы старогодного рельса звеньевом пути при пределе усталости металла 444 Н/мм² исходя из допущения, что стандартное отклонение постоянно и равно 41 Н/мм².

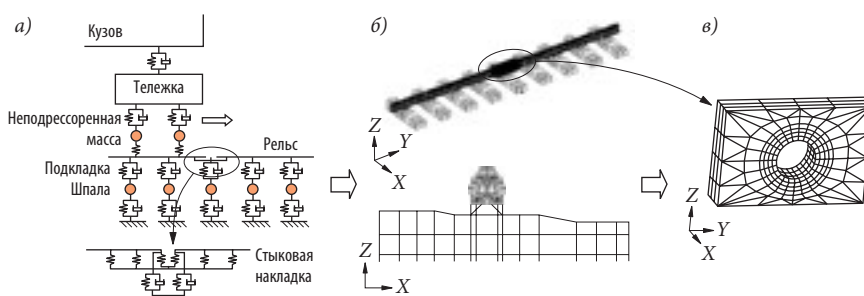


Рис. 7. Аналитическая модель динамических напряжений: а — балочная модель; б — объемная модель; в — сетка с малым шагом

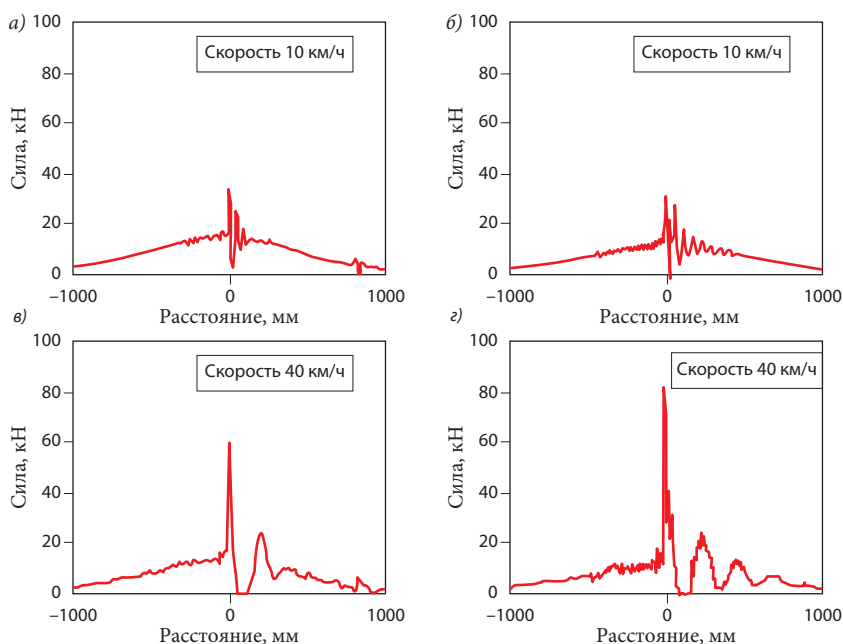


Рис. 8. Силы у подошвы рельса в ступенчатом стыке: при скорости 10 км/ч: а — измерения; б — расчет; при скорости 40 км/ч: в — измерения; г — расчет

К расчетной кривой S/N добавлены 10 фактических данных о разрушающих напряжениях в рельсах. Кривая S/N и фактические усталостные данные показаны на рис. 9.

Оценка остаточного срока службы звеньевом пути

Здесь использовано правило Майнера (Miner), модифицированное так, что градиент в области, где амплитуда напряжений не достигает предела усталости, становится в 2 раза меньше, чем в области за пределом усталости. В случае рельсов массой 50 кг/м для оценки напряжений использовались экспериментальные данные, полученные ранее; в случае рельсов массой 60 кг/м значения напряжений, полу-

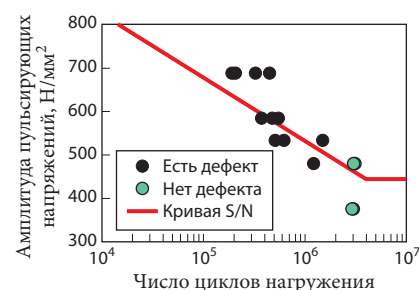


Рис. 9. Кривая S/N для старогодного рельса звеньевом пути с 50%-ной вероятностью разрушения

ченные в эксперименте, оказались относительно малыми вследствие небольших накопленных неровностей рельсов и поэтому были соответствующим образом скорректированы с учетом этих различий.

Определенные таким образом амплитуды напряжений в на-

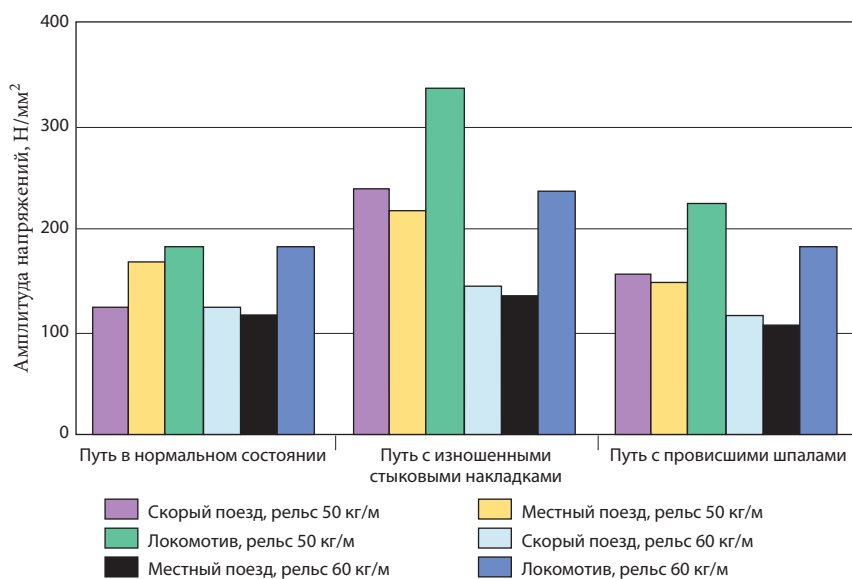


Рис. 10. Амплитуды напряжений в рельсе

ружном рельсе кривой для разных условий эксплуатации (как во время третьего цикла испытаний) показаны на рис. 10, остаточный срок службы при накопленном ранее старогодными рельсами тоннаже, равном 330 млн. т брутто, — на рис. 11.

Долговечность по фактору усталости с 0,1%-ной вероятностью излома для случаев нормального пути и пути с провисшими шпалами определена в 820 млн. т брутто для рельсов массой 50 кг/м и 1210 млн. т для рельсов массой 60 кг/м. Данные значения превышают принятый на железных дорогах Японии срок службы рельсов до замены, т. е. этот

срок может быть увеличен. Однако усталостная долговечность в случае пути с изношенными стыковыми накладками не превышает 10 млн. т брутто, что подтверждает важность своевременной замены таких накладок.

В то же время долговечность рельсов звеньев пути по фактору изгибной усталости, определенная по результатам предшествующих исследований, составила 690 млн. т брутто для рельсов массой 50 кг/м и более 890 млн. т для рельсов массой 60 кг/м, вследствие чего при оценке срока службы звеньев пути должен приниматься во внимание именно этот фактор.

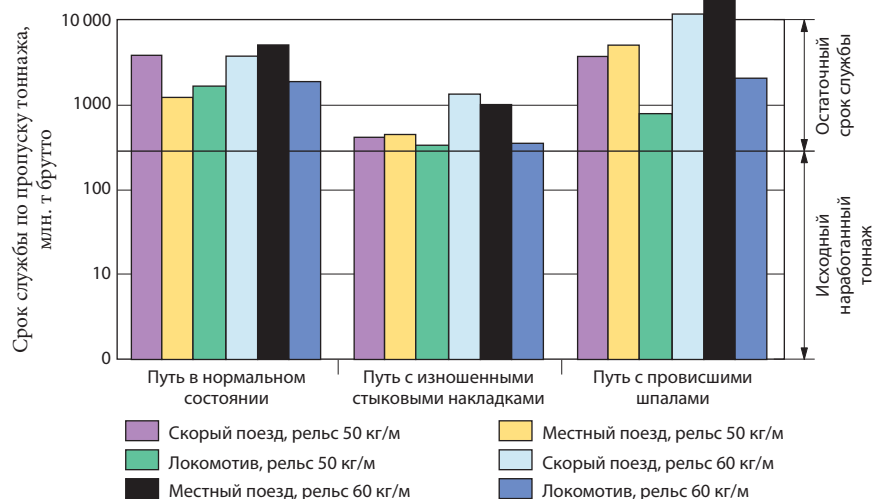


Рис. 11. Оценка остаточного срока службы старогодных рельсов

Заклучение

По результатам испытаний и расчетов, в том числе методом моделирования, сформулированы следующие выводы:

- разброс величин напряжений увеличивается по мере роста скорости проследования ступенчатого стыка с повышенным задним рельсом. Пиковые величины напряжений под действием ударной нагрузки коррелируют с нагрузкой от колеса на рельс. Амплитуды напряжений, определенные для рельсов массой 60 кг/м, наибольшие при пути с изношенными стыковыми накладками;

- усредненные амплитуды напряжений с внутренней и наружной стороны рельса зависят преимущественно от вертикальной нагрузки, а некоторые различия между ними зависят от величины поперечной нагрузки;

- аналитическая модель динамических напряжений, включающая моделирование взаимодействия пути и подвижного состава и моделирование по методу конечных элементов, была подтверждена результатами экспериментов;

- по результатам усталостных испытаний на изгиб получена кривая S/N, отражающая остаточный срок службы старогодных рельсов звеньев пути с усредненным пропущенным тоннажом 330 млн. т брутто;

- усталостная долговечность рельсов с вероятностью излома 0,1% при нормальном состоянии пути и пути с провисшими шпалами оценена в 820 млн. т брутто для рельсов массой 50 кг/м и 1210 млн. т для рельсов массой 60 кг/м, а при пути с изношенными стыковыми накладками — не более 10 млн. т брутто; изгибная усталостная долговечность рельсов звеньев пути оценена в 690 млн. т брутто для рельсов массой 50 кг/м и более 890 млн. т для рельсов массой 60 кг/м, что следует принимать во внимание при общей оценке срока службы рельсов.

H. Kataoka et al. Quarterly Report of RTRI, 2005, № 4, p. 250–255.