

Моделирование живучести боковой рамы трехэлементной тележки грузового вагона численными методами



А. Л. Протопопов,
старший научный сотрудник
АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)



В. С. Коссов,
д. т. н., профессор,
генеральный директор
АО «ВНИКТИ»



Э. С. Оганьян,
д. т. н.,
главный научный
сотрудник
АО «ВНИКТИ»



Г. М. Волохов,
д. т. н., заведующий
отделением динамики
и прочности подвижного
состава и инфраструктуры
АО «ВНИКТИ»



М. Н. Овечников,
д. т. н., заведующий
лабораторией
прочностных расчетов
АО «ВНИКТИ»

Представлена методика численного исследования развития дефектов литья (поверхностных, внутренних и сквозных), схематизированных эллиптическими трещинами, в углу буксового проема боковой рамы грузового вагона. Расчеты проводили в конечно-элементном программном комплексе MSC.Marc с использованием предметно-разработанных алгоритмов на языке программирования Python. Проведена верификация предложенной методики по фактическим случаям излома рамы в эксплуатации.

Крупногабаритным отливкам сложной конфигурации, в частности литым деталям тележек грузовых вагонов, свойственна исходная технологическая, а также приобретенная (эксплуатационная) дефектность (усталостные трещины), что может привести к аварийным разрушениям деталей в процессе их эксплуатации. Изломы боковых рам тележек грузовых вагонов нередко сопровождаются сходом вагона с рельсов, создают угрозу безопасности движения поездов, представляют опасность для жизни и здоровья граждан, приносят значительные убытки участникам перевозочного процесса.

В последнее время изломы боковых рам стало значительно больше, причем изломы появлялись в первые годы эксплуатации. Это косвенно подтверждает, что причина появления изломов — не приобретенные усталостные трещины, а исходные трещиноподобные технологические литейные дефекты. На основе

анализа изломов боковых рам по сечению в зоне внутреннего радиуса R 55 буксового проема, произошедших на сети железных дорог ОАО «РЖД», выявлено влияние характерных дефектов, их начальных размеров и мест локализации по сечению излома. Распределение влияния дефектов по указанным признакам представлено в виде диаграммы Парето [1].

Из полученной диаграммы следует, что примерно 78 % изломов боковых рам по сечениям в зоне R 55 вызваны главным образом двумя причинами:

- дефектами с выходом на наружную поверхность нижнего пояса;
- раковинами, рыхлотами, находящимися внутри нижнего пояса.

Сроки службы рамы по этим дефектам составляют от 1,4 до 8,8 лет. На остальные три категории дефектов приходится примерно 22 % изломов. Такой результат вполне логичен и отвечает основному принципу диаграммы Парето: 20 % причин вызывают 80 % проблем.

Для предотвращения аварий от излома боковых рам тележек в вагонном хозяйстве принята система диагностического метода неразрушающего контроля дефектов в литых деталях тележек грузовых вагонов в первый и последующие межремонтные интервалы эксплуатации. Дефектоскопия должна гарантированно выявлять дефекты определенных размеров, которые при их развитии могут привести к разрушению в следующий интервал межремонтного периода обследования грузовых вагонов. В связи с этим становится актуальной



ФОТО: СЕРГЕЙ ТЮРИН

необходимость определения указанных размеров, что выдвигает на первый план задачу по разработке методов для расчета кинетики роста исходных дефектов рамы, чтобы можно было с высокой надежностью прогнозировать безопасное их развитие в межремонтный период. При этом в теории традиционно для представления всех видов несплошностей (пор, включений, непроваров, надрывов и т. п.) используют их схематизацию эллиптическими трещинами [2].

Известно, что наиболее опасна в технике трещина типа «отрыв»: тип I раскрытия трещины [3]. Основная задача при расчете живучести конструкции с такой трещиной состоит в определении коэффициента интенсивности напряжения (КИН) на фронте трещины в зависимости от ее размеров.

Для определения КИН для трещины типа I в инженерной практике обычно используется следующее выражение [3]:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l} \cdot Y(l),$$

где K_I — коэффициент интенсивности напряжения для трещины типа I;

σ — номинальное напряжение в области развития трещины;

l — длина трещины;

$Y(l)$ — поправочная функция, зависящая от формы детали и ее напряженно-деформированного состояния (НДС).

Поправочная функция обычно берется по справочным данным для тел простых форм: пластин, оболочек [4]. Для боковой рамы, детали сложной формы (коробчатое сечение), сложного НДС (изгиб, растяжение), а также при учете возможного двухстадийного характера развития трещины (поверхностная и далее сквозная) весьма затруднительно подобрать поправочную функцию, необходимую для обеспечения достоверности вычисленного КИН. Эти сложности можно обойти, используя метод конечных элементов, который позволяет моделировать исходную дефектность и НДС в раме (реальной детали), рассчитывать инвариантный энергетический J-интеграл Райса (расходуемая энергия на малое приращение площади поверхности трещины).

В линейной механике разрушения J-интеграл связан с КИН следующим выражением [5]:

$$J = \frac{1}{H} \cdot (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot K_{III}^2,$$

где K_I , K_{II} и K_{III} — КИН раскрытия трещины по первому, второму и третьему типу разрушения соответственно [5];

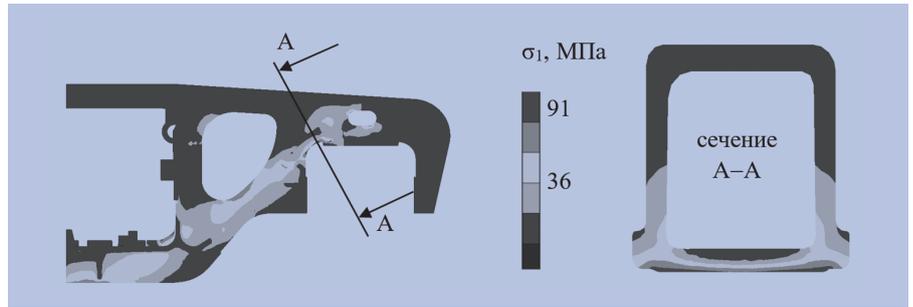


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние рамы при нагрузке на ось 23,5 тс

$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ — модуль сдвига;

H — эффективный модуль упругости, равный модулю упругости E для условий плоского напряженного состояния или $\mu = \frac{E}{1-\nu^2}$ для плоской деформации;

ν — коэффициент Пуассона.

Программный конечно-элементный комплекс MSC.Marc позволяет рассчитать этот интеграл и соответственно КИН по каждому типу раскрытия трещины, если в модели воспроизведена трещина и задан ее фронт. Нами исследовалось развитие трещины по первому типу. При этом очень важно, чтобы КИН определялся для конкретной детали с трещиной, т. е. с учетом геометрических особенностей формы рамы и НДС, включая локальную зону ее развития. Полученные с использованием изложенного подхода результаты могут быть основой для формулирования предложений по назначению научно обоснованных периодов дефектоскопии рам и минимальных размеров дефектов, которые должны быть гарантированно выявлены в межремонтные периоды эксплуатации.

С этой целью разработан программный модуль автоматического создания конечно-элементной модели боковой рамы тележки, содержащей трещиноподобные дефекты разных типов (внутренние, поверхностные, сквозные), для расчета КИН на фронте трещины и алгоритм численного моделирования ее развития на основе механики разрушения и эксплуатационных нагрузок.

Выполнен статический расчет НДС рамы без дефектов от вертикальной нагрузки, который подтверждает концентрацию напряжений в зоне внутреннего радиуса буксового проема (рис. 1). Анализ направления первого главного напряжения в этой зоне позволяет установить ориентацию плоскости (сечение А-А), к которой эти напряжения перпендикулярны в зоне их максимальных значений. Ее можно считать плоскостью, в которой происходит дальнейшее развитие исходных дефектов.

Для моделирования развития (под-

растания) трещиноподобных дефектов разных типов в зоне внутреннего радиуса R55 буксового выреза боковой рамы с учетом изменения градиента и направления КИН специально разработан и реализован в виде программы расчетный модуль (макрос) на основе использования процедурных команд программного конечно-элементного комплекса MSC.Marc и языка программирования Python.

Его алгоритм предусматривает автоматическую реализацию трех этапов:

1) создание конечно-элементной 3D-модели боковой рамы тележки, содержащей трещиноподобные дефекты разных типов (поверхностные, сквозные) в зоне внутреннего радиуса R55 буксового выреза; исходный дефект моделировался в отдельной конечно-элементной подконструкции трещиной с эллиптическим фронтом заданных размеров;

2) статический расчет НДС рамы с трещиной заданных размеров и типа при осевой нагрузке 23,5 тс для определения КИН на ее фронте;

3) развитие фронта трещины на основе положений механики разрушения и эксплуатационного блока амплитуд вертикальных сил в буксовом проеме рамы.

Расчетная конечно-элементная модель половины рамы с исходным поверхностным дефектом, результаты расчета НДС и КИН после реализации этапов 1 и 2 показаны на рис. 2.

Конечно-элементная модель рамы состоит из двух частей: основной и подконструкции, содержащей трещину. Конечно-элементная сетка для основной части при расчетах не меняется. В подконструкции программным модулем на основе использования процедурных команд автоматически генерируется трещиноподобный дефект с различными параметрами (геометрические размеры трещины, размеры конечно-элементной сетки).

В качестве эксплуатационной нагрузки использовали блок амплитуд вертикальных сил в буксовом проеме [6],

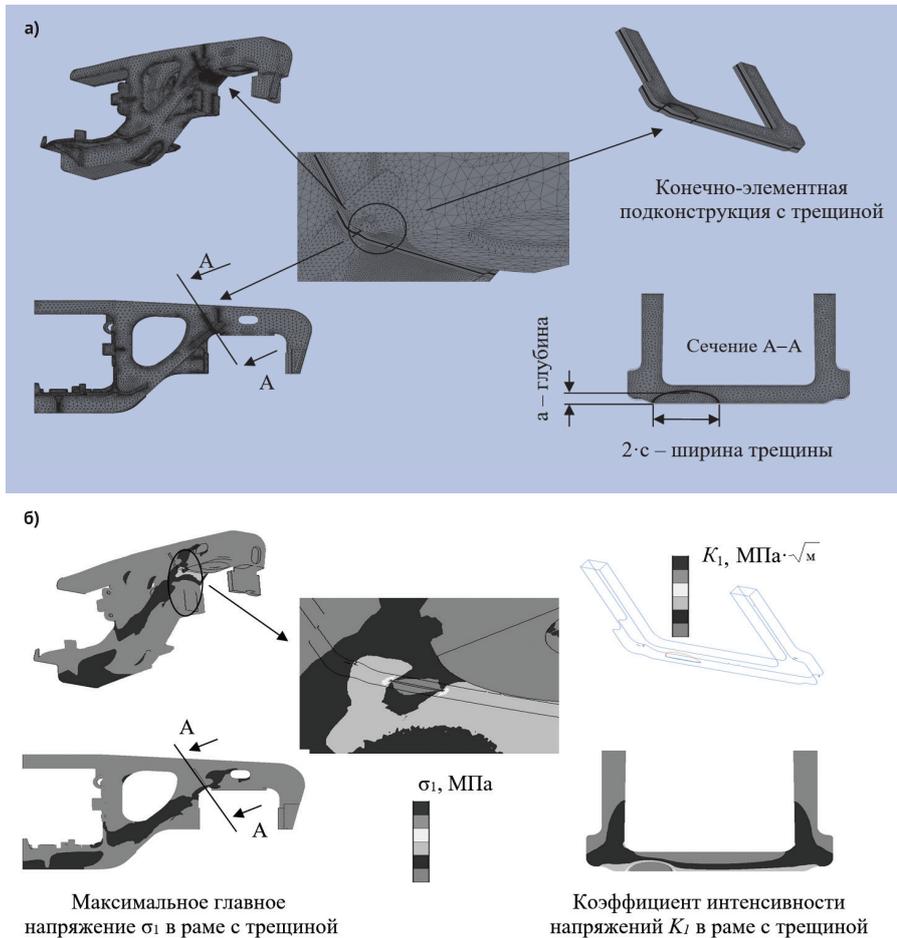


Рис. 2. Конечно-элементная модель рамы с трещиной, напряженно-деформированное состояние и коэффициент интенсивности напряжений на ее фронте при осевой нагрузке 23,5 тс

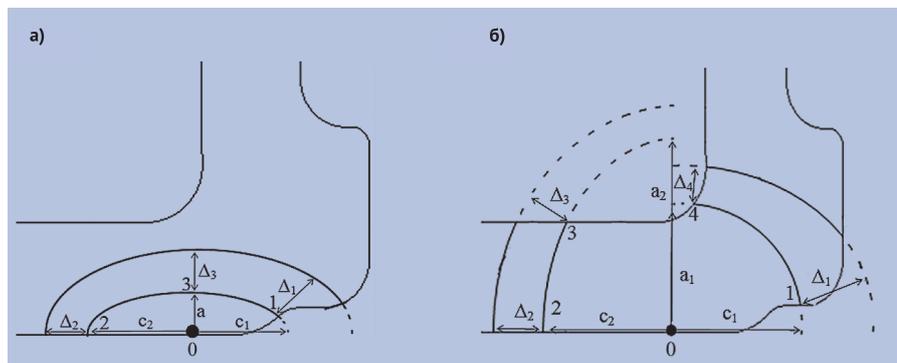


Рис. 3. Графическое представление алгоритма моделирования разрастания фронта разных типов трещин: а) поверхностная трещина на нижней стенке с выходом на боковую стенку (прорастание на толщину); б) сквозная трещина (прорастание до разрушения)

а для кинетической диаграммы усталостного разрушения металла — зависимость скорости развития трещины V , предложенная А. Пэрисом, которая позволяет в инженерных приложениях с достаточной степенью точности давать оценку живучести металлоконструкций [7]:

$$V=C[\Delta K]^n, \quad (3)$$

где C, n — эмпирические характеристики циклической трещиностойкости материала;

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ — размах КИН в цикле нагружения.

Формула (3) описывает средний (линейный) участок полной кинетической диаграммы усталостного разрушения, имеющей в большинстве случаев S-образный вид. Диаграмма графически показывает связь характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Условием разрушения (долома)

считается достижение размаха КИН на фронте трещины циклической вязкости разрушения ΔK_{fc} .

Характеристики трещиностойкости этой диаграммы были взяты согласно рекомендациям [7] для широкого класса малоуглеродистых сталей.

Развитие трещин разных типов (рис. 3) на третьем этапе моделируется как изменение размеров их текущего фронта в результате геометрических приращений, перпендикулярных эллиптическим дугам в его контрольных точках (1–4), для формирования нового фронта трещины. Поверхностная трещина доходит до толщины сквозной трещины, сквозная — до размеров, приводящих к разрушению.

Алгоритм моделирования разрастания фронта трещины (этап 3) сводился к суммированию приращений в контрольных точках текущего фронта трещины в зависимости от рассчитанного в них КИН при статической нагрузке (этап 2) и прикладывании от цикла к циклу блока амплитуд вертикальных сил с возможным его повторением до достижения суммарного приращения в какой-либо контрольной точке назначенного предельного подрастания на фронте значения. При таком подходе учитываются возможные значения скорости разрастания фронта в его контрольных точках.

Значение предельного разрастания фронта трещины назначается из условия, что КИН на новом фронте отличается от КИН на предыдущем (текущем) фронте не более, чем на 10 %.

Моделирование развития фронта трещины от исходного до разрушения приведено на рис. 4. Там же показан эскиз развития фронта трещины для фактического случая разрушения рамы в эксплуатации.

Результаты исследования позволяют сделать ряд предварительных заключений.

1. Подтверждается удовлетворительное совпадение расчетных результатов модели развития трещины со случаями разрушения рам в эксплуатации.

2. Разрушение рамы (хрупкий излом) от исходных поверхностных дефектов в зоне внутреннего радиуса R55 буксового выреза происходит на этапе развития сквозной трещины, т. е. когда исходный поверхностный дефект пророс на толщину стенки рамы.

3. Согласно полученным результатам КИН на фронте трещины при ее развитии до разрушения рамы площадь усталостной трещины до хрупкого излома

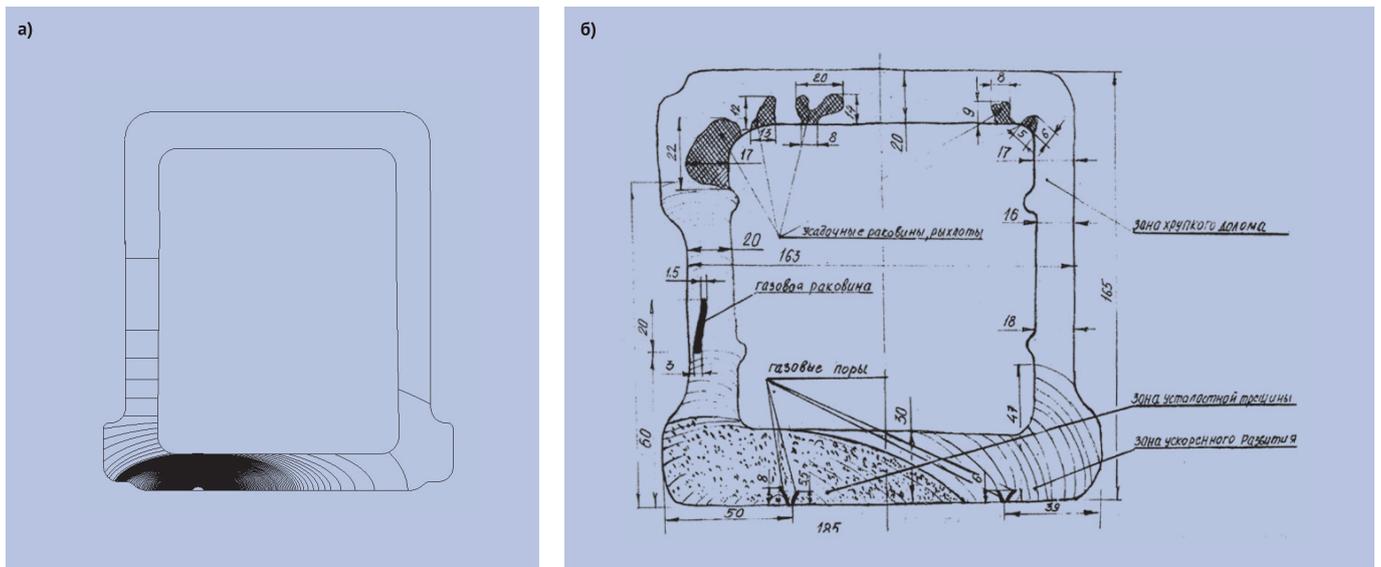


Рис. 4. Сравнение моделирования развития фронта трещины от исходного до разрушения (а) с фактическим случаем разрушения рамы в эксплуатации (б)

в зависимости от сезона (времени года) эксплуатации может составлять от 20 до 50 % площади сечения рамы.

4. Время развития сквозной трещины до потери несущей способности составляет 2 % от времени развития исходного дефекта до разрушения.

5. Оценка живучести рамы определяется как время прорастания исходного дефекта на толщину стенки рамы до сквозной трещины.

Для оценки живучести рамы были проведены численные исследования трещиноподобных дефектов поверхностных и внутренних разных геометрических размеров в зоне радиуса R 55 буксового выреза по предложенной методике. Для определения размеров

допустимых (имеющих запас живучести два года в период межремонтного обслуживания вагонов) поверхностных дефектов в наиболее нагруженном месте в зоне внутреннего буксового выреза исследовалось время прорастания исходных дефектов разных размеров на глубину 18 мм. Исходные поверхностные дефекты моделировались полуэллиптическими трещинами. Минимальная глубина начальной трещины a принималась равной 2 мм, а ширина $c_1+c_2=4$ мм, причем для исходной трещины отношения $a:c_1$ и $a:c_2$ принимались одинаковыми. Варьировались размеры глубины и ширины исходной трещины для определения времени их развития до прорастания на толщину стенки рамы.

На рис. 5 показано визуальное развитие фронта трещины через равное количество циклов нагружения, а также изменение соотношений $a:c_1$ и $a:c_2$ в зависимости от глубины прорастания трещины для некоторых исследуемых ее начальных размеров. Из полученных результатов видно, что независимо от начальных размеров исходной трещины соотношения $a:c_1$ и $a:c_2$ на глубине $a = 10$ мм становятся практически одинаковыми.

Поэтому можно предположить, что начальный фронт сквозной трещины после прорастания исходной трещины будет одинаков для всех исходных трещин независимо от их начальных размеров и, следовательно, будет одинаково время до разрушения при развитии сквозной трещины. На основании результатов расчетов боковой рамы с дефектами в зоне внутреннего угла буксового проема R 55 на рис. 6 приведена зависимость величины пробега грузового вагона до разрушения рамы тележки в зависимости от исходного размера поверхностного дефекта площади S в буксовом проеме. В скобках показан радиус полуокружности данной площади. Исходя из этой зависимости, можно назначать требования к размерам дефектов в зоне буксового проема рамы тележки, которые должны быть обнаружены для обеспечения безопасности их эксплуатации в период межремонтного осмотра.

Таким образом, из анализа НДС боковой рамы тележки грузового вагона следует, что наиболее опасной зоной для зарождения и развития усталостных трещин является угол буксового проема

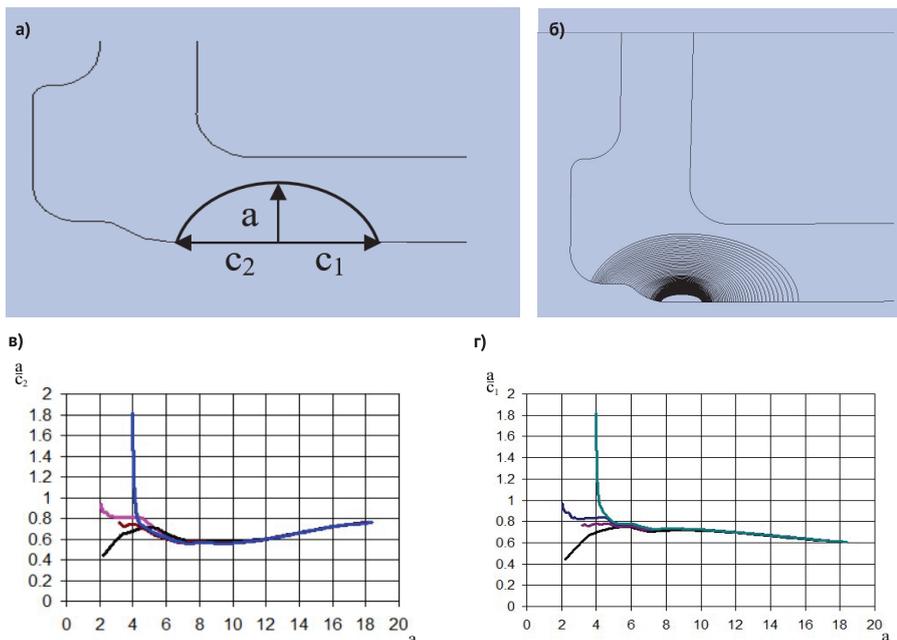


Рис. 5. Развитие фронта трещины

ФОТО: СЕРГЕЙ ТЮРИН



(зона радиуса R55). Это подтверждается разрушениями в эксплуатации.

При моделировании развития усталостной трещины до потери несущей способности рамы воспроизведением трещиноподобного геометрического дефекта в зоне угла буксового проема установлено, что возможна ее удовлетворительная реализация двухстадийным воспроизведением (поверхностная и сквозная стадии). Это подтверждается качественно фотографиями поперечных сечений эксплуатационных изломов боковин.

Подтверждается удовлетворительное качественное и количественное совпа-

дение расчетных результатов модели развития трещины с фактическими разрушениями рам в эксплуатации.

Период живучести рамы со сквозной трещиной незначителен и составляет несколько (3–5) процентов от общего времени до разрушения.

С учетом зависимости пробега грузового вагона до разрушения боковой рамы тележки от размера дефекта в буксовом проеме можно назначать требования к размерам дефектов в этой зоне, которые должны быть выявлены для безопасной эксплуатации в период межремонтного осмотра.

Литература

1. Коссов В. С., Оганьян Э. С., Красюков Н. Ф. и др. Оценка условий безопасности эксплуатации литых деталей тележки грузового вагона // Тяж. машиностр. 2016. № 6. С. 20–24.
2. Гетман А. Ф., Козин Ю. Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. — М.: Энергоатомиздат, 1997. — 288 с.
3. Броек Д. Основы механики разрушения. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
4. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2 т. / Пер. с англ.; под ред. Ю. Мураками. — М.: Мир, 1990. — 448 с.
5. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури. М.: Мир, 1990. 392 с.
6. Северинова Т. П. Спектр нагруженности боковой рамы тележки грузового вагона в эксплуатации // Исследование прочности, устойчивости воздействия на путь и техническое обслуживание вагонов в поездах повышенной массы и длины: сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. — М.: Транспорт, 1992. С. 70–80.
7. Москвичев В. В., Махутов Н. А., Черняев А. П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. — Новосибирск: Наука, 2002. — 333 с.

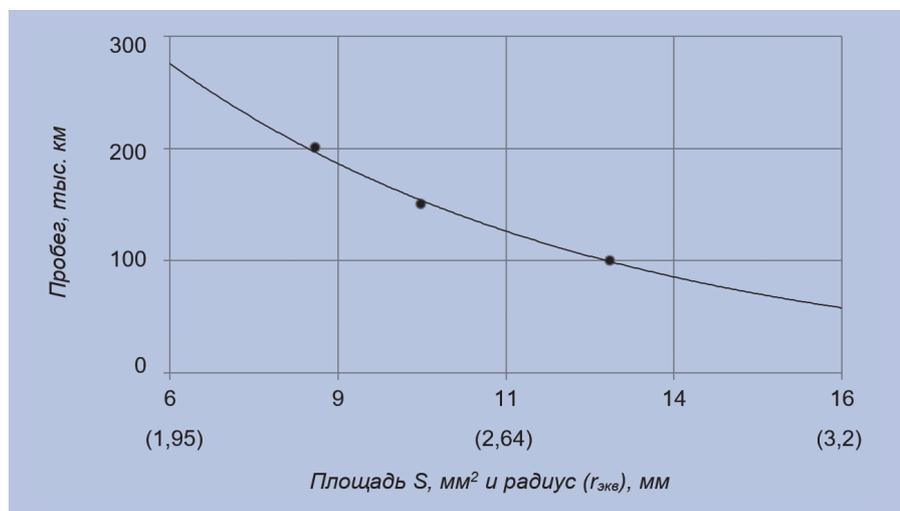


Рис. 6. Зависимость пробега грузового вагона до разрушения боковой рамы тележки при поверхностном дефекте в буксовом проеме площадью S