

УДК 539.3:624.04

## **Оценка и регулирование свойств рам карьерных самосвалов с трещиноподобными дефектами**

**С.В. Доронин<sup>а</sup>, Т.В. Донцова<sup>\*б</sup>**

<sup>а</sup> *Специальное конструкторско-технологическое бюро  
«Наука» КНЦ СО РАН  
Россия 660049, Красноярск, пр. Мира, 53*  
<sup>б</sup> *Сибирский федеральный университет  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*<sup>1</sup>

Received 09.11.2012, received in revised form 16.11.2012, accepted 23.11.2012

---

*Статья посвящена постановке и решению задач анализа и управления живучестью проектируемых несущих конструкций большегрузных автосамосвалов. Проведен анализ чувствительности характеристик напряженно-деформированного состояния рам карьерных автосамосвалов к эксплуатационным трещиноподобным дефектам. Приведен алгоритм численного моделирования рамных конструкций. Обоснована периодичность технической диагностики рам, а также поставлена и решена задача количественного обоснования геометрических параметров конструктивного усиления поврежденной зоны рамы.*

*Ключевые слова: рамы автосамосвалов, несущие конструкции, напряженно-деформированное состояние, трещина, трещиноподобный дефект.*

---

### **Введение**

Проектирование технических систем (ТС), как правило, осуществляется в предположении, что их количественные и качественные характеристики на протяжении всего жизненного цикла системы будут находиться в пространстве допустимых состояний, определяемом принятыми конструктивными и техническими решениями, выполненными проектными расчетами. По ряду причин это предположение не всегда оказывается справедливым, что приводит к неопределенности характеристик системы (характеризуется низким уровнем знаний о текущем состоянии и возможных траекториях ее эволюции), нештатному ее функционированию, формированию предпосылок возникновения предельных состояний, аварий и катастроф.

Одним из способов снижения указанной неопределенности является разработка моделей, методов, алгоритмов анализа поведения ТС при выходе их характеристик за пределы пространства допустимых состояний. Аналитическое и численное моделирование нештатного функционирования ТС на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ расши-

---

\* Corresponding author E-mail address: t.v.dontsova@gmail.com

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

ряет представление об их потенциальной способности выполнять свои функции при наличии поврежденных элементов систем и нерегламентированных нормативными расчетами внешних воздействий различной природы. В рамках современной терминологии речь идет о постановке и решении задач анализа и управления живучестью проектируемых ТС.

Применительно к силовым (несущим) конструкциям ТС большая часть задач анализа и управления живучестью сводится к исследованию и регулированию изменения характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) и долговечности элементов конструкций, содержащих трещиноподобные дефекты технологического и эксплуатационного происхождения.

Рассмотрим основные типы таких задач, решенных применительно к рамам карьерных автосамосвалов. Актуальность данных задач обусловлена статистическими данными по отказам машин в условиях Мазульского известнякового и Кия-Шалтырского нефелинового рудников ОАО «РУСАЛ Ачинск» (общий парк самосвалов БелАЗ-540 и БелАЗ-549 около 40 единиц), показывающими, что типичными повреждениями рам являются трещины усталости в вертикальных листах лонжеронов.

### **Чувствительность НДС рам к эксплуатационным трещиноподобным дефектам**

Оценка опасности эксплуатационного трещиноподобного дефекта непосредственно связана с анализом чувствительности характеристик НДС рам к его наличию. Опасность дефекта определяется его местоположением, ориентацией и уровнем нагруженности поврежденного элемента конструкции.

Для оценки фактического характера деформирования фрагмента лонжерона, ослабленного трещиной, используется технология конечно-элементного моделирования с применением подконструкций. Данный подход основан на том, что наличие трещины оказывает влияние только на НДС в локальной зоне, сравнимой по размерам с размерами трещины и усилений. Для этого установленная расчетом наиболее нагруженная зона рамы моделируется подконструкцией, содержащей трещину (рис. 1).

По результатам решения статической задачи по определению НДС рамы устанавливаются граничные условия подконструкции (смещения узлов по ее контуру). Далее эти условия переносятся на контур рассчитываемой отдельно подконструкции, для которой выполняется мелкая дискретизация расчетной области. Таким образом, для одних и тех же условий деформирования рамы выполняется исследование ее чувствительности к наличию трещины того или иного размера при минимальных временных затратах и приемлемой точности результатов.

Выполнено численное моделирование рамных конструкций четырех модификаций автосамосвалов БелАЗ с использованием метода подконструкций. Технология проведения серии вычислительных экспериментов представлена следующим алгоритмом:

1. На базе выполненного анализа НДС рам автосамосвалов для каждой рамы установлен участок вертикального листа лонжерона, представляющий потенциальную опасность по трещинообразованию и разрушению. Выбор этого участка осуществлен следующим образом.

Для каждой рамы проанализировано НДС во всех расчетных случаях и установлен перечень конструктивных зон с уровнем напряжений выше среднего по конструкции. Далее из этого перечня выбрана наиболее нагруженная зона, локализованная в области конструктивных

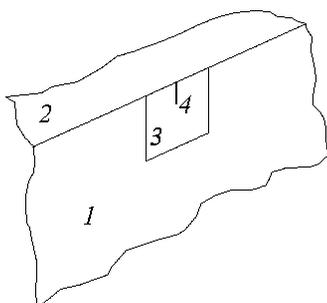


Рис. 1. Схема использования подконструкции: 1 – фрагмент стенки лонжерона; 2 – фрагмент полки лонжерона; 3 – подконструкция; 4 – трещина

концентраторов напряжений и объемного НДС: сочленения лонжеронов и поперечин, крепления элементов подвески. Дальнейшие построения выполнялись в предположении, что эта зона лимитирует надежность и живучесть несущей рамы и показатели живучести, полученные для этой зоны, можно рассматривать в качестве консервативных оценок для всей конструкции.

2. Конечно-элементные модели несущих рам модифицированы с целью введения в выбранную зону каждой рамы площадки, моделируемой в дальнейшем подконструкцией с трещиной (рис. 2). Повторены статические расчеты, но в качестве их результатов рассматривались не характеристики НДС, а граничные условия (вычисленные значения поступательных и вращательных перемещений) по контуру этой площадки, вызванные деформированием всей несущей рамы. Эти граничные условия сохранены в качестве внешних нагрузок, прикладываемых в дальнейшем на подконструкции.

3. Для всех четырех рам смоделированы подконструкции, содержащие трещину. Эти подконструкции представляют собой площадки, геометрически идентичные соответствующим площадкам, предусмотренным в моделях рам, и имеют те же координаты границ в глобальной системе координат. Трещина во всех подконструкциях рассматривалась переменной длины (от 5 до 25 мм) для оценки влияния размера дефекта на характеристики НДС. Граничные условия, сохраненные на предыдущем шаге, перенесены на подконструкции, и выполнен их локальный расчет.

4. Проведен анализ результатов, позволивший установить характерные особенности полей напряжений в вертикальных листах лонжеронов, содержащих эксплуатационные трещины. В вершинах трещины возникают области значительных концентраций напряжений, размеры которых невелики по сравнению с длиной трещины. Уровень концентрации напряжений весьма быстро снижается по мере удаления от вершины трещины. Области, примыкающие к берегам трещины, разгружены от деформирования и характеризуются гораздо меньшим по сравнению со всей подконструкцией уровнем напряжений.

5. В качестве одного из показателей чувствительности НДС к наличию трещиноподобного дефекта для четырех расчетных случаев построены зависимости максимальных напряжений в подконструкции с трещиной от ее длины  $\sigma = f(l)$  (рис. 3). Для обеспечения сравнимости результатов зависимости построены не в абсолютных, а в относительных единицах  $u = \sigma_{max}/\sigma_{ном} = f(l)$ , где  $\sigma_{max}$  – максимальный уровень интенсивности напряжений в подконструкции с трещиной;

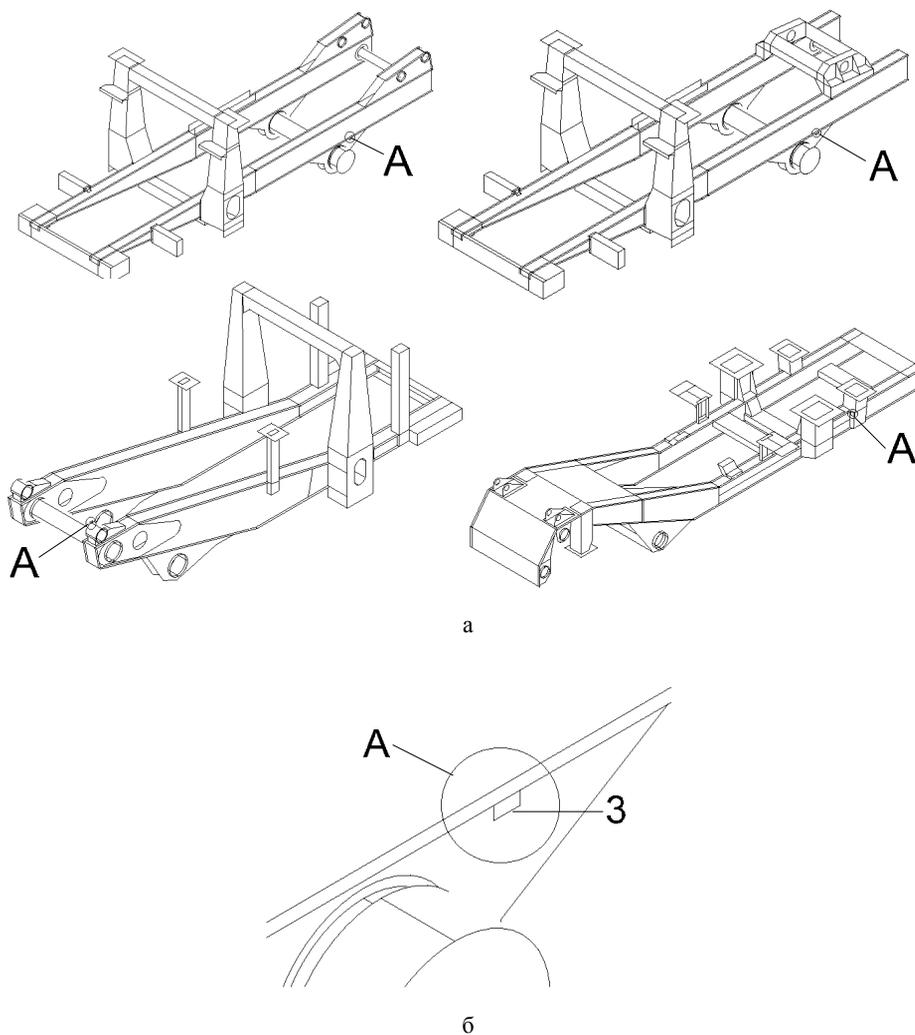


Рис. 2. Моделирование подконструкций в рамах автосамосвалов (А – зона расположения подконструкции, 3 – подконструкция): а – общий вид расположения подконструкций в рамах БелАЗ-549, БелАЗ-7420, БелАЗ-75191, БелАЗ-7548а; б – укрупнено расположение подконструкции в раме БелАЗ-549

$\sigma_{ном}$  – номинальный уровень интенсивности напряжений в соответствующей области неповрежденной конструкции.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Для всех рассмотренных модификаций рамных конструкций при всех режимах нагружения наблюдается устойчивый рост характеристик напряженного состояния. При этом интенсивность роста оказывается весьма различной и характеризует чувствительность конструкции к наличию повреждения. По мере снижения чувствительности рамы самосвалов могут быть ранжированы следующим образом: БелАЗ-75191, БелАЗ-7420, БелАЗ-549, БелАЗ-7548а.

2. Для рассмотренных расчетных случаев не удается установить наиболее тяжелый с точки зрения опасности эксплуатационных трещин. С увеличением длины трещины величины  $\sigma_{max}/\sigma_{ном}$  растут практически пропорционально для всех указанных расчетных случаев. Это

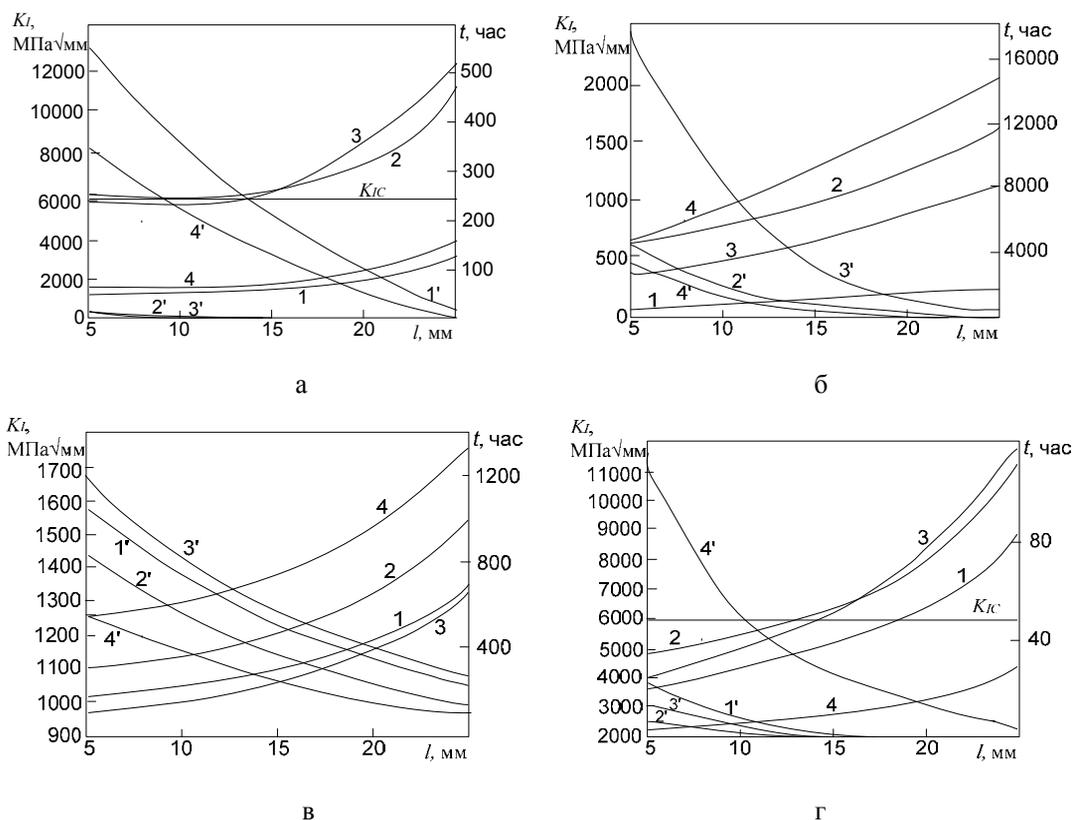


Рис. 3. Зависимости  $u=f(l)$  для подконструкции рам самосвалов БелАЗ-549 (а), БелАЗ-7420 (б), БелАЗ-75191 (в), БелАЗ-7548а (г): 1 – номинальное опирание на все колеса, 2 – кручение, 3 – продольный изгиб, 4 – поперечный изгиб

свидетельствует о том, что в данном случае доминирует общий уровень номинального напряжения в рамной конструкции.

### Оценка опасности разрушения и обоснование периодичности технической диагностики рам

При наличии эксплуатационного трещиноподобного дефекта возможен ряд предельных состояний, из которых для рам карьерных автосамосвалов с наибольшей вероятностью реализуются хрупкие или усталостные разрушения. Повышенная опасность хрупких разрушений обусловлена преимущественно низкотемпературными условиями эксплуатации и значительной долей динамических составляющих нагрузки, а усталостных – циклическим характером деформирования. Опасность хрупкого и усталостного разрушения оценивается в ходе расчетов на статическую и циклическую трещиностойкость.

При расчетах на трещиностойкость в качестве критерия разрушения для элементов конструкций горно-транспортных машин целесообразно использовать коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Основанием для его применения является то, что условия реализации усталостных и хрупких разрушений, характерных для металлоконструкций горных машин, с удовлетворительной точностью описываются данным критерием.

Укрупненно методику расчетов на трещиностойкость можно представить так: рассматривается элемент конструкции с технологическим или эксплуатационным дефектом заданного размера и формы, схематизируемым в виде трещины. При известных значениях параметров напряженного состояния в соответствии с аналитическими расчетными схемами и численными методами рассчитываются текущие значения КИН, которые сравниваются с его критическими значениями. Это является основой для принятия решения о допустимости эксплуатации, а также для расчета циклической долговечности.

Применительно к рамам автосамосвалов в качестве критерия предельного состояния принимаем КИН для трещины типа I  $K_I$ , поскольку он удовлетворяет следующим требованиям: 1) соответствие возможному характеру разрушения рассматриваемых элементов конструкции; 2) правомерность использования критерия в диапазоне условий эксплуатации рам; 3) возможность практического получения необходимой информации для расчета текущего и критического значений критерия.

В соответствии с положениями линейной механики разрушения в качестве условия отказа принято достижение текущей длиной трещины  $l$  ее критического значения  $l_c = f(K_{Ic}, \sigma, Y)$ , после которого начинается нестабильное разрушение

$$l \geq l_c, \quad (1)$$

где  $Y$  – поправочная функция (величина, учитывающая геометрические особенности элемента конструкции и расположения в нем трещины). Критическое значение размера трещины определяется из выражения

$$l_c = g(K_{Ic}, \sigma, Y) = K_{Ic}^2 / (\pi(\sigma Y)^2). \quad (2)$$

Критический КИН  $K_{Ic}$  определяется с использованием обобщенной зависимости сопротивления хрупкому разрушению с учетом температуры эксплуатации [1].

Поскольку номинальные напряжения находятся в пределах, соответствующих области правомерного применения линейной механики разрушения, то размах КИН соответствует среднему участку диаграммы усталостного разрушения, а следовательно, для сравнительных оценок правомерно использование в качестве кинетического уравнения зависимости Перриса-Эрдогана. Интегрирование этого уравнения дает возможность вычислить время роста трещины от размера  $l_i$  до  $l_{i+1}$  ( $l_i, l_{i+1}$  – размеры трещины на границах интервала  $i$ -го шага интегрирования от  $l_0$  до  $l_c$ ):

$$N = f(l_i; l_{i+1}) = \frac{2}{(m-2) \cdot C \cdot Y \cdot \Delta \sigma^m} \cdot \left[ \frac{1}{l_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{l_{i+1}^{(m-2)/2}} \right], \quad (3)$$

где параметры циклической трещиностойкости приняты для низколегированных перлитных сталей в размере  $C = 2,883 \cdot 10^{-4}$ ,  $m = 2,66$ .

Поскольку в процессе подрастания трещины изменяется ее геометрия, поправочная функция  $Y$  вычисляется на каждом шаге интегрирования.

Предположим наличие краевой трещины в зоне выреза вертикального листа поперечины рамы самосвала. В соответствии с приведенными уравнениями построены зависимости коэффициента интенсивности напряжений (расчетная схема – полоса с одним боковым разрезом в

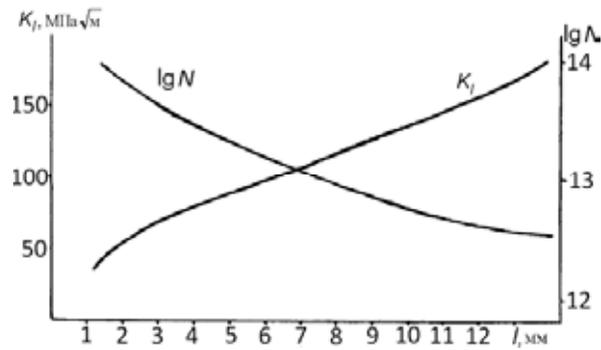


Рис. 4. Зависимости коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  и долговечности  $N$  от длины трещины  $l$

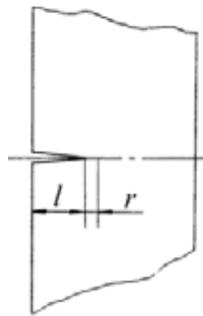


Рис. 5. Расчетная схема конструктивной зоны с трещиноподобным дефектом

условиях изгиба [2]) и усталостной долговечности при регулярном гармоническом нагружении (использовано кинетическое уравнение Пэриса) от длины трещины  $l$  (рис. 4).

Для различных конструктивных вариантов эти кривые будут отличаться друг от друга. Очевидно, что чем более пологи графики построенных зависимостей, тем менее чувствительна данная конструктивная форма к наличию эксплуатационного трещиноподобного повреждения и тем выше ее живучесть.

Задача по численному определению КИН для поврежденных фрагментов рам автосамосвалов, для которых отсутствуют аналитические расчетные схемы, решается в соответствии со следующим алгоритмом:

1. В области вершины трещиноподобного дефекта на продолжении его оси рассматривается несколько точек с изменением расстояния  $r = (0,05-0,1)l$  и определяются напряжения  $\sigma_y$  в этих точках (рис. 5).

2. В связи с тем, что точки рассматриваются на осевой линии, значение угла  $\theta$  в выражении [2]

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

равно нулю, и оно упрощается до  $\sigma_y = K_I / \sqrt{2\pi r}$ . Получаемое отсюда  $K_I$  вычисляется для нескольких рассматриваемых точек и выполняется его экстраполяция при  $r \rightarrow 0$ .

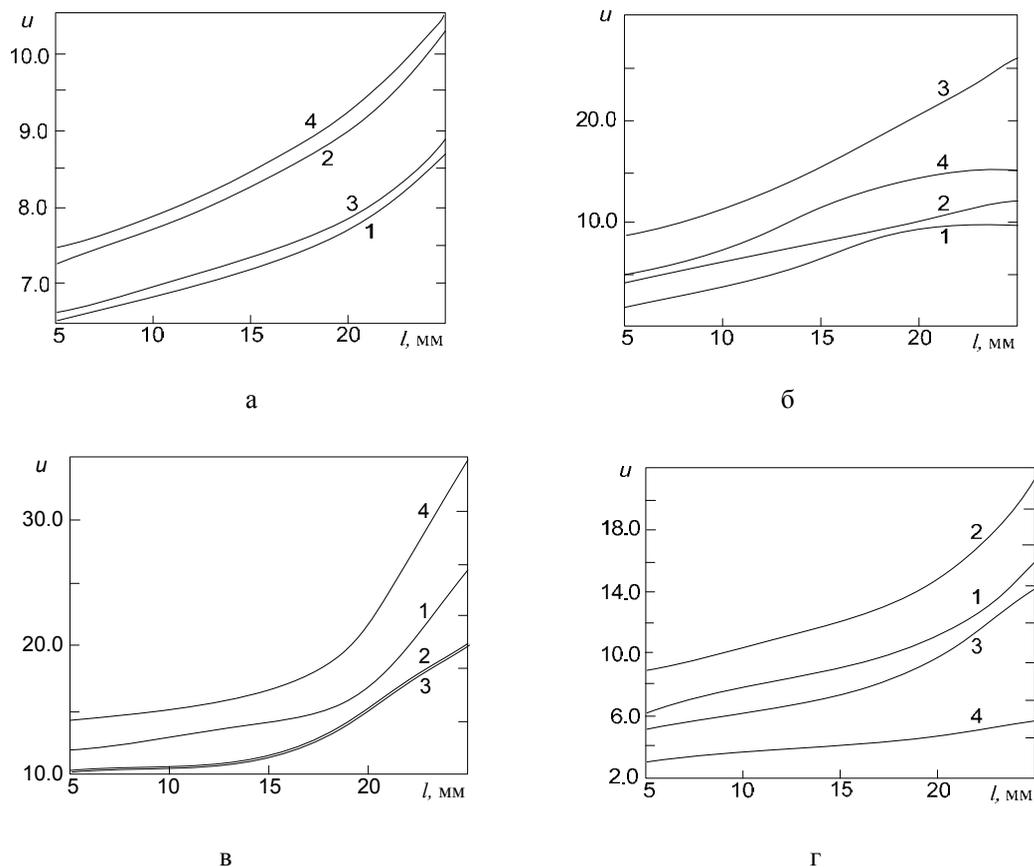


Рис. 6. Зависимости коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  и долговечности  $t$  от длины трещины  $l$  для рам автосамосвалов БелАЗ-75191 (а), БелАЗ-7420 (б), БелАЗ-549 (в), БелАЗ-7548а (г)

Для расположения трещин в подконструкциях рам в соответствии с рис. 2 построены расчетные зависимости КИН  $K_I$  и долговечности  $t$  (определяемой по  $N$  в соответствии с (3) и выражаемой в часах с учетом режима работы машин) от длины трещины  $l$  для рам автосамосвалов (рис. 6).

На этих рисунках номера кривых 1, 2, 3, 4 соответствуют зависимостям КИН, а 1', 2', 3', 4' – зависимостям долговечности. Кривые 1, 1' соответствуют равномерному опиранию на четыре опоры, 2, 2' – кручению, 3, 3' – продольному изгибу, 4, 4' – поперечному изгибу рамы.

Критическое значение КИН  $K_{Ic}$  принято равным  $5750 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}$  [1].

Соотношение между числом циклов циклического нагружения  $N$  и числом моточасов  $t$  устанавливалось исходя из кривых усталости рам автосамосвалов и сроков их службы до капитального ремонта [3].

При анализе полученных зависимостей сделаны следующие выводы:

1. При малых длинах трещин (до 10 мм) опасность хрупкого разрушения отсутствует у рам всех типов, причем у рам самосвалов БелАЗ-549 и БелАЗ-7420 она отсутствует во всем диапазоне рассматриваемых длин трещин (до 25 мм).

2. У рам БелАЗ-7548а опасность хрупкого разрушения возникает при различных видах трещин в зависимости от характера деформирования: 16 мм при равномерном опирании, 11 мм при кручении и продольном изгибе, 25 мм при поперечном изгибе. Таким образом, при наличии трещины 25 и более мм для рамы БелАЗ-7548а существует опасность хрупкого разрушения при всех видах деформирования.

3. У рам БелАЗ-75191 опасность хрупкого разрушения возникает при длинах трещин 11 мм при кручении и продольном изгибе, при равномерном опирании и поперечном изгибе во всем диапазоне рассматриваемых длин трещин эта опасность отсутствует.

4. Учитывая, что наработка рам до капитального ремонта в среднем не превышает 250 тыс. км, а один моточас работы самосвала соответствует 10-13 км [3, 4], можно утверждать, что для всех рассмотренных конструкций рам существует опасность усталостного повреждения до наступления капитального ремонта. Следовательно, необходимо периодическое проведение технической диагностики и дефектоскопического контроля всех типов рам.

5. Периодичность технической диагностики определяется в предположении наличия трещины длиной до 5 мм. Это обусловлено тем, что при малых размерах трещин скорость их роста незначительна и за период между двумя моментами технической диагностики не возникает опасности хрупкого разрушения. Рекомендуемая периодичность технической диагностики определяется как  $t_5/n_N$ , где  $t_5$  – прогнозируемая долговечности рамы при наличии трещины длиной 5 мм,  $n_N = 2$  – минимальный коэффициент запаса по долговечности. Тогда расчетные рекомендуемые периодичности технической диагностики рам составляют: БелАЗ-7548а – 1000 км; БелАЗ-549, БелАЗ-75191 – 3000 км; БелАЗ-7420 – 12 000 км.

### **Обоснование параметров конструктивных усилений поврежденных фрагментов рам**

Таким образом, наличие повреждений одного из элементов рамы, чаще всего вертикального листа лонжерона, резко снижает прочность и живучесть всей конструкции. Рассмотрим возможности усиления поврежденной конструкции с использованием одного из инженерных методов.

Известны теоретические подходы торможения и остановки трещин, связанные с использованием электрических, магнитных, термических и термоупругих полей, упругих импульсов сжатия, двойниковых прослоек, ветвления трещин, системы других трещин и ряд других. Большинство этих подходов, будучи теоретически обоснованными, затруднительны к применению в реальных конструкциях машин и оборудования. Для решения практических задач применяются в основном методы, основанные на снижении коэффициента интенсивности напряжений [5]. В инженерной практике основное значение придается использованию сталей с умеренной величиной ударной вязкости и применению надлежащим образом сконструированных приспособлений для остановки трещин [6]. Среди наиболее практичных здесь рассматриваются приспособления типа поглотитель энергии (слой материала с высокой вязкостью и трещиностойкостью), ремонтные заплаты (накладки) и ребро жесткости.

Выполнена серия расчетов с целью обоснования геометрических размеров ремонтной заплаты. Актуальность задачи обусловлена следующим. Уменьшение размеров заплаты может привести к снижению тормозящего трещину эффекта, а увеличение приводит к увеличению

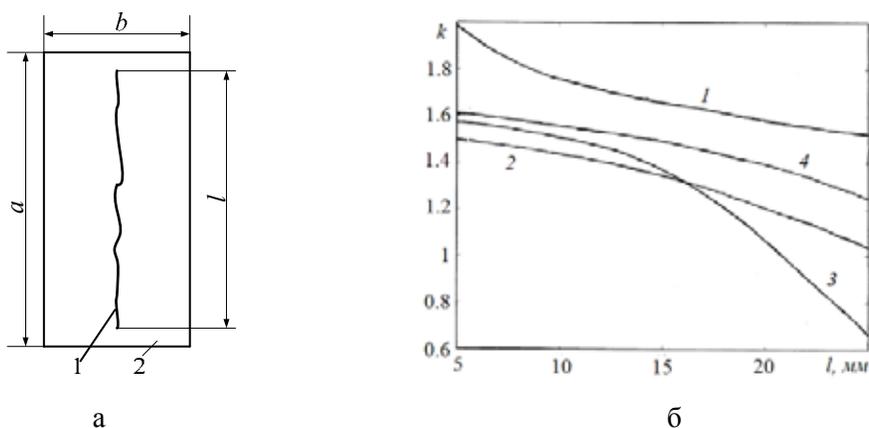


Рис. 7. Влияние размеров прямоугольной ремонтной заплаты на ее эффективность: а – схема установки ремонтной заплаты (1 – трещина; 2 – заплата); б – зависимость показателя эффективности заплаты от длины трещины (1 – БелАЗ-549; 2 – БелАЗ-7420; 3 – БелАЗ-75191; 4 – БелАЗ-7548а)

длины сварного шва, площади зоны термовлияния и повышению хрупкости рассматриваемой конструктивной зоны, и так ослабленной сварным швом, которым заварена трещина. Для оценки эффективности ремонтной заплаты введен расчетный показатель  $k = \sigma_{\text{crack}} / \sigma_{\text{pz}}$  – отношение напряжения  $\sigma_{\text{crack}}$  в зоне трещины к напряжению  $\sigma_{\text{pz}}$  в этой же зоне после установки ремонтной заплаты. Очевидно, с ростом этого показателя эффективность заплаты растет. В соответствии со схемой (рис. 7, а) варьировались соотношения  $a/b$  (длина и ширина заплаты), а также соотношение  $a/l$  при различных длинах трещины.

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшей эффективностью характеризуется заплата, длина которой больше длины трещины примерно на 10 %, т.е.  $a/l = 1,1$ . При меньшей длине заплаты коэффициент  $k$  падает. С ростом  $a/l$  коэффициент  $k$  продолжает расти, но прирост его крайне незначителен и не компенсирует отрицательных эффектов, связанных с увеличением размеров заплаты.

2. Наибольшей эффективностью характеризуется заплата с соотношением  $a/b = 2$ . При меньшем соотношении увеличивается зона конструкции под заплатой, а при большем есть опасность выхода зоны термовлияния шва, устраняющего трещину, за пределы заплаты.

3. В результате исследования зависимости коэффициента  $k$  от длины трещины (рис. 7, б) установлено, что наиболее эффективны ремонтные заплаты при малых длинах трещин. С увеличением длин трещин эффективность этого способа усиления поврежденного элемента резко падает.

Таким образом, выполнено обоснование конструктивных решений и организационно-технических мероприятий, обеспечивающих адекватную оценку опасности и предотвращение возникновения и развития эксплуатационных трещин, приводящих к хрупким разрушениям рам автосамосвалов.

### Выводы

1. Анализ чувствительности НДС рам к наличию трещиноподобного дефекта является начальным и необходимым этапом при выполнении расчетов конструкций с учетом дефектов и

повреждений. Он позволяет установить конструктивные зоны, развитие дефектов в которых представляет наибольшую опасность для конструкции.

2. В качестве количественного показателя чувствительности НДС к наличию дефекта принято отношение максимальных значений интенсивности напряжений в рассматриваемой конструктивной зоне при наличии и отсутствии дефекта. Для рассматриваемых типов рам построены количественные зависимости чувствительности от длины дефекта при различных видах деформирования. Установлено, что размер дефекта является более важным фактором, чем характер деформирования.

3. Для оценки опасности хрупких и усталостных разрушений при развитии трещиноподобных дефектов с использованием методов вычислительной механики разрушения построены зависимости коэффициента интенсивности напряжений и долговечности рамы от длины трещины. Это позволило для рассмотренных типов рам для всех видов деформирования установить предельно допустимые размеры трещиноподобных дефектов. С учетом опасности дефектов для каждого типа рам обоснованы рекомендуемые значения периодичности технической диагностики.

4. Поставлена и решена задача количественного обоснования геометрических параметров конструктивного усиления поврежденной зоны рамы в виде прямоугольной ремонтной заплаты. Для оценки ее эффективности введено отношение напряжения в зоне трещины к напряжению в этой же зоне после установки ремонтной заплаты. Установлено, что эффективным способом усиления зон трещинообразования вертикальных листов лонжеронов является прямоугольная заплата с соотношением сторон 1:2 и длиной, превышающей длину трещины в среднем на 10 %.

5. Выполнение технической диагностики и конструктивных усиления в соответствии с рекомендациями, разработанными на основе анализа чувствительности НДС рам к наличию дефектов и опасности последних, позволяет предотвратить хрупкие и усталостные разрушения рам вследствие неконтролируемого развития эксплуатационных трещиноподобных дефектов.

6. Результаты анализа НДС, в том числе при наличии трещиноподобного дефекта, представляют собой основу оценки повреждающего воздействия нагрузок на рамы при погрузке и транспортировании горной массы, в связи с чем необходима разработка расчетных методик, применение которых на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ позволит снизить чувствительность конструкций к наличию трещиноподобных дефектов, повысить их защищенность от аварийных разрушений.

***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-08-00945а).***

#### **Список литературы**

- [1] Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / Новосибирск: Наука, 2002. 334 с.
- [2] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
- [3] Кулешов А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров. М.: Недра, 1980. 317 с.

[4] Казарез А.А., Кулешов А.А. Эксплуатация карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией. М.: Недра, 1988. 264 с.

[5] Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.

[6] Хан Дж., Розенфилд А., Маршалл К., Хоагленд Р., Гелен П., Каннинен М. Концепция остановки трещины и ее применение // Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин: сб. статей. М.: Мир, 1981. С. 222-253.

## **Assessment and Control for Behavior of Dump Trucks Frames with Crack Defects**

**Sergey V. Doronin<sup>a</sup> and Tatiana V. Dontsova<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Special Design and Technological Bureau  
«Nauka» KSC SB RAS*

*53 Mira Krasnoyarsk 660049 Russia*

<sup>b</sup> *Siberian Federal University*

*79 Svobodny Krasnoyarsk 660041 Russia*

---

*The paper is dedicated to statement and solution problems of analysis and control for heavy dump trucks frames survivability. The analysis of stress-strain state sensitivity to crack defects is fulfilled. There is worked out an algorithm for frame structures numerical modeling. The paper contains reasoning for periodicity of technical troubleshooting and results of quantitative reasoning of structural reinforcement geometrical characteristics for damaged frame zone.*

*Keywords: trucks frames, carrying structures, stress-strain state, crack, crack defect.*

---