

УДК 629.3

DOI: 10.46960/2782-5477_2023_3_28

С.А. Багичев, Д.Н. Прошин, А.И. Алтышев
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ РАМЫ АВТОПРИЦЕПА –
КОМПЛЕКСНЫЙ ИНСТРУМЕНТ В ПРОИЗВОДСТВЕ
АВТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена возможность использования конечно-элементного метода при моделировании напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта в судебной (досудебной) экспертизе совместно с металловедческими и другими исследованиями для определения точной причины разрушения узла (детали) автомобильного транспортного средства. Показано, что применение данных методик в экспертизе совместно с другими позволяет провести более полное и всестороннее исследование для выявления и обоснования причины произошедшего отказа в указанные законодательством сроки.

Ключевые слова: *автотехническая экспертиза, моделирование напряженно- деформированного состояния, численный метод конечных элементов, рама автоприцепа.*

Технические сложности производства автотехнических экспертиз включают ограниченные возможности применения отдельных выбранных методов исследования, с которыми сталкивается эксперт (специалист). Они могут быть связаны с отсутствием соответствующего материально-технического обеспечения, высокой стоимостью выбранных видов исследования, отсутствием апробированных (утвержденных) методов, непригодностью выбранных образцов к некоторым видам исследований ввиду их неисправности и невозможности предоставления их исправных аналогов.

Экспертиза – исследование, проводимое привлеченным компетентным лицом в целях получения ответов на вопросы, возникающие в правоотношениях между субъектами права, с целью разрешения спорных ситуаций, установления фактических данных. Одной из инженерно-транспортных экспертиз является автотехническая, направленная чаще всего на установление причин и механизма выхода из строя той или иной детали, узла, агрегата автомобиля. Разновидностями автотехнической экспертизы являются экспертиза технического состояния ТС и автотовароведческая (оценка ТС).

Одним из основных принципов производства автотехнической экспертизы является ее полнота и всесторонность. Поскольку она является исследованием, инициируемым заинтересованными лицами, важное значение имеют также сроки и стоимость. Это означает, что специалист должен при производстве технической экспертизы рассмотреть все возможные причины, которые могли бы привести к выходу из строя исследуемого объекта, и, применив комплекс различных исследований (апробированных методов), выяснить истинную причину в установленные законом сроки. Комплекс исследований должен позволить эксперту (специалисту) сделать обоснованный и объективный вывод о причине произошедшего.

В настоящей статье рассмотрен пример применения экспертами-автотехниками подхода, включающего моделирование напряженно-деформированного состояния по методу конечных элементов (КЭ). Применение КЭ-метода при проведении технических экспертиз в совокупности с другими позволяет эксперту (специалисту) упростить задачу по определению истинной (обоснованной) причины выхода из строя исследуемого объекта.

Методика исследования

Для определения причин разрушения объекта был использован комплекс металлургических исследований [1, 2] совместно с методом моделирования напряженно-деформированного состояния.

Комплексное исследование проводилось в несколько этапов:

1) органолептическая проверка (визуальный осмотр) объекта исследования и анализ его сервисной истории;

2) исследования качества конструктивного материала (металла), включающие:

- *фрактографическое исследование* поверхности разрушения (идентификация излома) с применением панкратического микроскопа МСП-2 (*излом* – поверхность, образующаяся в результате возникновения и развития трещин в металлах и сплавах);

- *измерение твердости поверхности* с применением по методу Роквелла на приборах *Rockwell 574*;

- *металлографическое исследование* структуры выбранных участков детали на макро- и микрошлифах в оптическом микроскопе *Neophot-21 (Karl Zeiss, Германия)* при увеличениях от 100 до 2000 крат до и после травления 5 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте (макрошлиф – образец металла со шлифованной поверхностью, обработанной химическим реактивом; микрошлиф – образец металла с полированной поверхностью, обработанной химическим реактивом или нетравленный); для макросъемки использовался цифровой фотоаппарат *Nikon D3000 (Nikkor 55-200 f/4.0)*, для микросъемки – цифровой фотоаппарат *Canon PowerShot A1100 IS*;

3) специальные исследования химического состава материала образца с применением *FOUNDRY-MASTER* – спектрометра с оптической системой по схеме Пашена-Рунге, фокальным расстоянием 350 мм;

4) моделирование напряженно-деформированного состояния объекта с использованием линейного неявного решателя программного комплекса по методу конечных элементов в нелинейной постановке (для решения могут использоваться пакеты прикладных программ *ABAQUS, NASTRAN (PATRAN), LS-DYNA* и др.)

Результаты, обсуждение

В исследуемом автоприцепе при эксплуатации произошел выход из строя его рамы (разрушение конструктивного элемента). Типовой автоприцеп показан на рис. 1.



Рис. 1. Автоприцеп как объект автоэкспертизы

Было установлено, что разрушение лонжерона рамы не было связано с качеством материала и произошло по конструктивным причинам: ввиду наличия в конструкции технологических отверстий под заклепочные соединения – концентраторов напряжений. Конструкция рамы не обладала необходимым запасом прочности и не могла противостоять совокупному действию негативных внешних факторов. Месторасположение вырезки исследуемой области показано на рис. 2.



Рис. 2. Местоположение зоны исследования (до и после вырезки образца)

На техническое состояние, ресурс и долговечность рамы ТС влияет много факторов [3]. Разрушение элементов конструкции может быть вызвано рядом причин, в ходе экспертного исследования должны быть рассмотрены и проанализированы следующие возможности:

- нарушение условий эксплуатации (влияние внешней механической нагрузки, превышающей предел прочности конструкции и материала), данная нагрузка может быть создана перевозимым грузом (перегруз) или реакциями, передаваемыми от дороги (циклическая вибрационная нагрузка);
- проведение ремонта, выполненного с нарушением технологического процесса (разрушение элементов кузова может быть следствием ДТП или результатом имевших место ранее ремонтных работ);
- наличие производственного дефекта, заложенного на стадии изготовления рамы автоприцепа.

Согласно предварительным данным, полученным в ходе органолептической проверки рамы исследуемого ТС, причин эксплуатационного характера, способных вызвать отмеченные повреждения, установлено не было. Кроме того, в сервисной истории не было зафиксировано ремонтных работ, проведенных ранее с рамой исследуемого ТС. Поэтому далее был проведен демонтаж образца рамы в зоне разрушения для проведения металловедческих исследований [4, 5]. В ходе фрактографического исследования зоны разрушения и поверхности излома (рис. 3) при помощи панкратического микроскопа МСП-2 по виду и цвету поверхности излома определяют наличие макродефектов, а также характер разрушения. Было установлено, что разрушение не носит силовой характер. Металлургических дефектов на поверхности излома деталей в виде крупных пор и неметаллических включений не было выявлено. На рис. 4 показано состояние берегов трещины, привязанной к технологическому отверстию. Трещина – магистральная, ответвлений не имеет, она распространялась одновременно в обе стороны от отверстия: вверх до края лонжерона, вниз – остановилась в месте сгиба.

Излом после раскрытия трещины был загрязнен продуктами коррозии. После очистки выявилась поверхность с изначально волокнистой, но затертой впоследствии сердцевинной, с плоскими блестящими участками среза. Излом произошел под углом, близким к 90° , что обычно встречается при перегрузке изгибом. Явных очагов разрушения не было выявлено, как и характерной для усталостного разрушения многозонности излома. Имеется пластическая деформация; излом классифицирован как вязко-хрупкий.

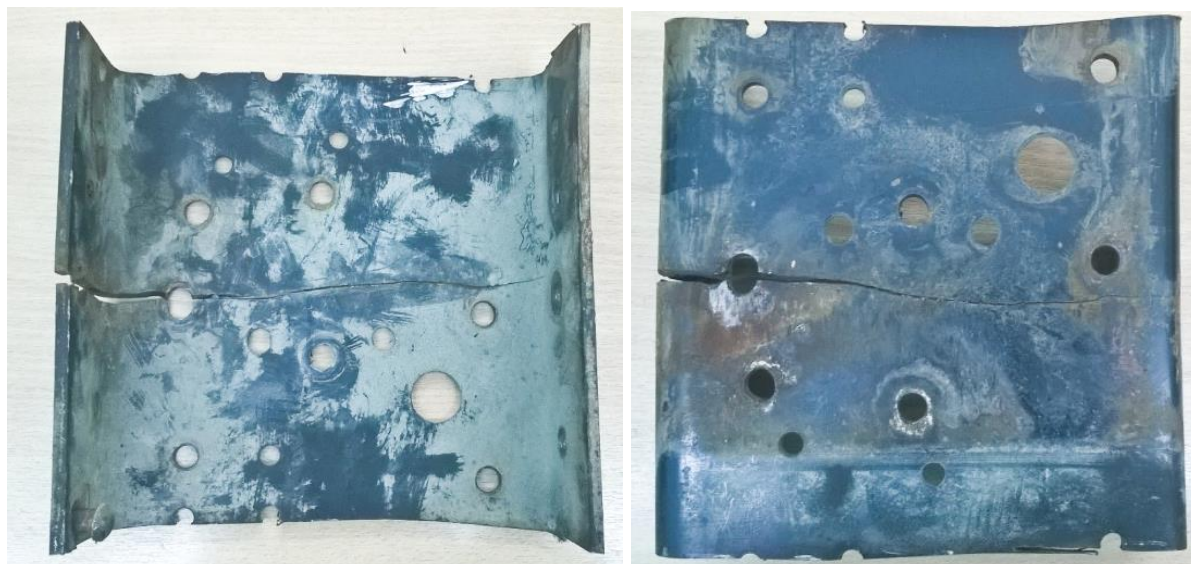


Рис. 3. Общий вид образца (фрагмента лонжерона) изнутри и снаружи



Рис. 4. Характер поверхности излома образца, 20X

При испытании на твердость по Роквеллу в поверхность испытуемого металла вдавливают алмазный конус с углом 120° или сильно закаленный шарик диаметром 1,59 мм. Шарик и конус вдавливают в испытуемый образец, последовательно прилагая предварительную F_0 и основную F_1 нагрузку. После вычисления твердости по Роквеллу по шкале HRB осуществлен перевод в единицы твердости по Бринеллю. Твердость фрагмента лонжерона находится в пределах 70-73 HRB, что в среднем соответствует 125-132 НВ. Твердость низкоуглеродистой стали марки 10 горячекатаной или отожженной должна быть не более 137 НВ.

Из части вырезанного образца лонжерона рамы был изготовлен микрошлиф. Исследование микроструктуры металла заключается в изучении поверхности протравленных микрошлифов с помощью микроскопа при увеличениях от 100 до 2000 крат. Микрошлифы изготавливаются и обрабатываются так же, как и макрошлифы, но их поверхность дополнительно обрабатывается на полировальном станке. Травление черных металлов производят 5 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Микроисследования выявляют структуру металла, характерные особенности фотографируются. Обнаруженные дефекты позволяют объяснить снижение прочности и пластичности металла и причину разрушения.

На рис. 5 представлена микроструктура стали, из которой изготовлен лонжерон, при разных увеличениях. Составляющими структуры являются мелкие зерна феррита, цементит третичный, малое количество пластинчатого перлита, т.е. данный железный сплав является низкоуглеродистой сталью в горячекатаном состоянии. Загрязнения примесями и несплошности типа пор и микротрещин, микродефекты структурных составляющих не выявлены.

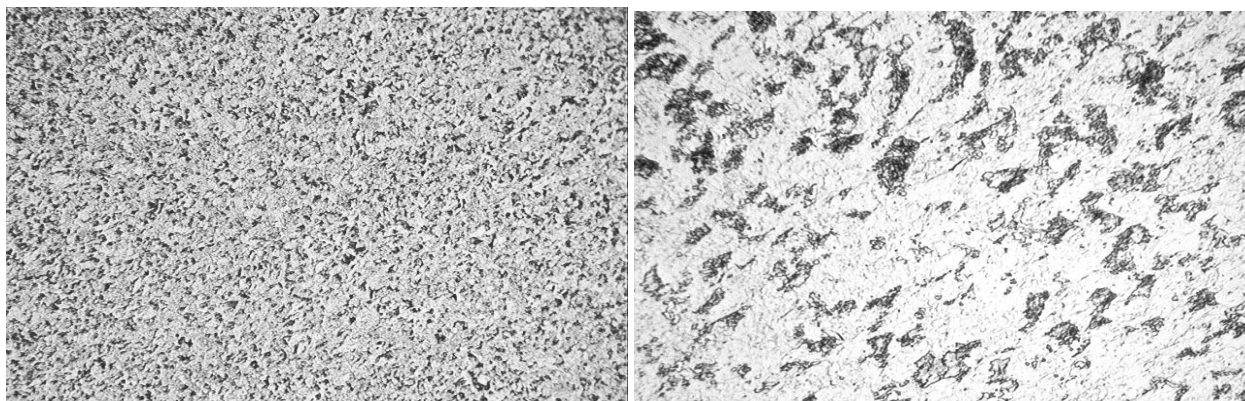


Рис. 5. Микроструктура материала представляет собой мелкие зерна феррита, цементит третичный, малое количество пластинчатого перлита. Увеличение в 200 и 1000 раз

Результаты специальных измерений по определению химического состава материала лонжерона рамы, определенного с помощью спектрометра «OBLF QSN 750», представлены в табл. 1. Диапазон чувствительности по большинству элементов составляет 0,001 %, по некоторым элементам – до 0,0001 %. Возможна быстрая идентификация марок сплавов по марочнику. Определение состава велось по 18 химическим элементам.

Таблица 1.

Химический состав материала лонжерона, %

<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>
99.1	0.199	0.141	0.459	0.014	0.016	<0.00	0.006	0.006
				4	1	5	8	
<i>Cu</i>	<i>Nb</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>Sn</i>	<i>Ca</i>	<i>S</i>	<i>Co</i>
0.010	<0.00	0.002	<0.001	0.020	0.003	0.000	0.011	0.001
1	2	6	5	3	0	6	4	9

Химический состав стали, из которой изготовлена плита, ближе всего к маркам 20пс, Ст3пс (табл. 4). Сталь 20пс применяется без термообработки или после нормализации для изготовления патрубков, штуцеров, корпусов аппаратов, работающих при температурах от -20 до 425°C. Сталь 3пс применяется для изготовления несущих и ненесущих элементов сварных и несварных конструкций, работающих при положительных температурах. Фасонный и листовый прокат (5-й категории) толщиной до 10 мм предназначен для несущих элементов сварных конструкций, работающих при переменных нагрузках в интервале от -40 до +425 °С.

Таблица 2.

Химический состав сталей, %

	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>As</i>
Ст3пс	0.14-0.22	0.05-0.17	0.40-0.65	до 0.3	до 0.05	до 0.04	до 0.3	до 0.3	до 0.08
20пс	0.17-0.24	0.05-0.17	0.35-0.65	до 0.25	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.25	до 0.08

Ст3пс ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества.

Марки 20пс ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия.

Металлургических дефектов в материале лонжерона не установлено. Технологические дефекты в исследуемом образце не были предусмотрены, поэтому не подлежали исследованию. Таким образом, проведенный комплекс металлургического исследования установил, что разрушение лонжерона рамы не носит силовой характер вследствие приложения нагрузки, не превышающей конструктивную прочность изделия.

Возникает вопрос: как определить, рассчитана ли исследуемая конструкция (если она уже разрушена) на восприятие допустимой нагрузки; был ли допущен конструктивный дефект (погрешность)? Одним из вариантов решения может быть запрос и исследование (нагружением) аналогичного исправного автоприцепа, его рамы или лонжерона. В этом случае может быть получен вывод о способности конструкции выдерживать штатную нагрузку. Однако этот вариант может быть затруднителен по причине невозможности предоставления исправного автоприцепа (рамы или лонжерона), необходимости разборки разрушенного узла с последующим монтажом исправного, поиска специализированного лабораторного оборудования для испытаний, изготовления необходимой оснастки. Более простой вариант – применить зарекомендовавший себя [1, 6] комплекс моделирования напряженно-деформированного состояния.

В выбранном программном конечно-элементном пакете в соответствии с размерами, снятыми с исследуемого объекта, была разработана модель исследуемой рамы. Детали были соединены друг с другом при помощи 1D-элементов, имитирующих сварные и болтовые элементы (рис. 6, 7).

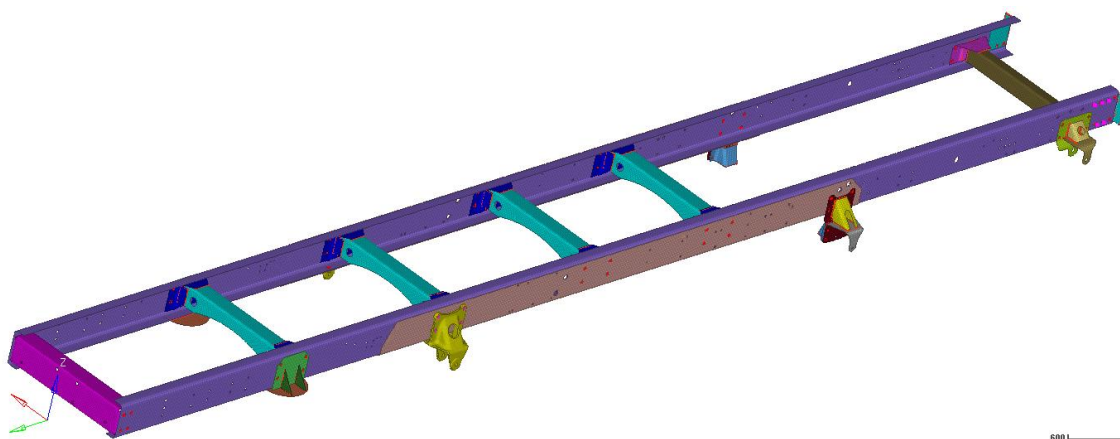


Рис. 6. Вид конечно-элементной модели рамы в сборе

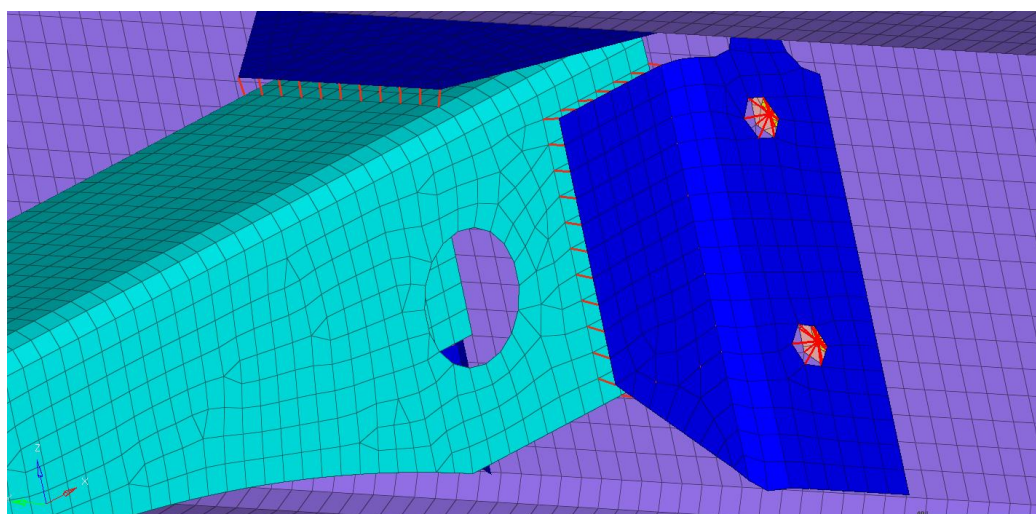


Рис. 7. Фрагмент конечно-элементной модели рамы в месте излома

Для определения фактических значений его механических свойств (предела текучести и предела прочности) были изготовлены стандартизированные образцы материала лонжерона рамы и проведены их испытания (рис. 8). При невозможности в отдельных случаях изготовить стандартизированные образцы можно исходить из металловедческого исследования по определению материала конструктивного элемента с последующим принятием его характеристик согласно стандартам и справочной литературе. В настоящем исследовании за материал, из которого изготовлен лонжерон рамы, была принята Ст3пс. Примеры характеристик сталей приведены в табл. 3.



Рис. 8. Испытания образца на разрывной машине

Таблица 3.

Механические свойства сталей при толщине до 20 мм

Марка стали	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
Ст3кп	360-460	235	27
Ст3пс	370-480	245	26
Ст3сп	380-490	245	26
Ст3Гпс	370-490	245	26
Ст3Гсп	390-570	245	24

Граничные условия и условия нагружения КЭ модели выбирались согласно указанным в литературе типовым вариантам закрепления и нагружения транспортных средств [1, 6]. Из них в анализе эксплуатационной прочности несущих систем наиболее широкое распространение получили: чистое кручение, вывешивание отдельных колес, действие максимальной изгибной нагрузки, распределенной по грузовому кузову. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (деформированное состояние и максимальные деформации в конструкции рамы, а также распределение максимальных напряжений в элементах рамы) представлены на рис. 9-10.

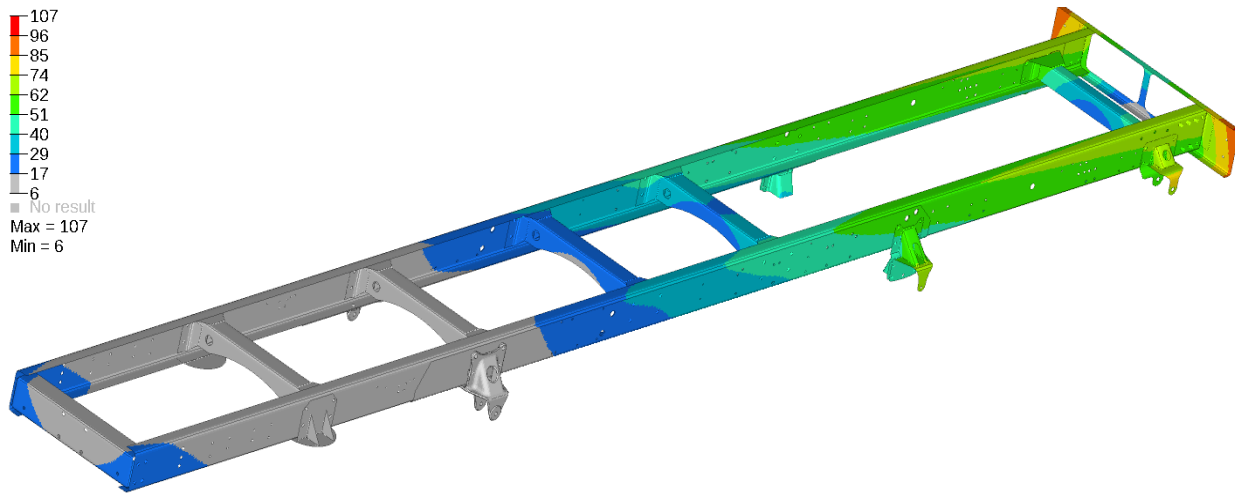
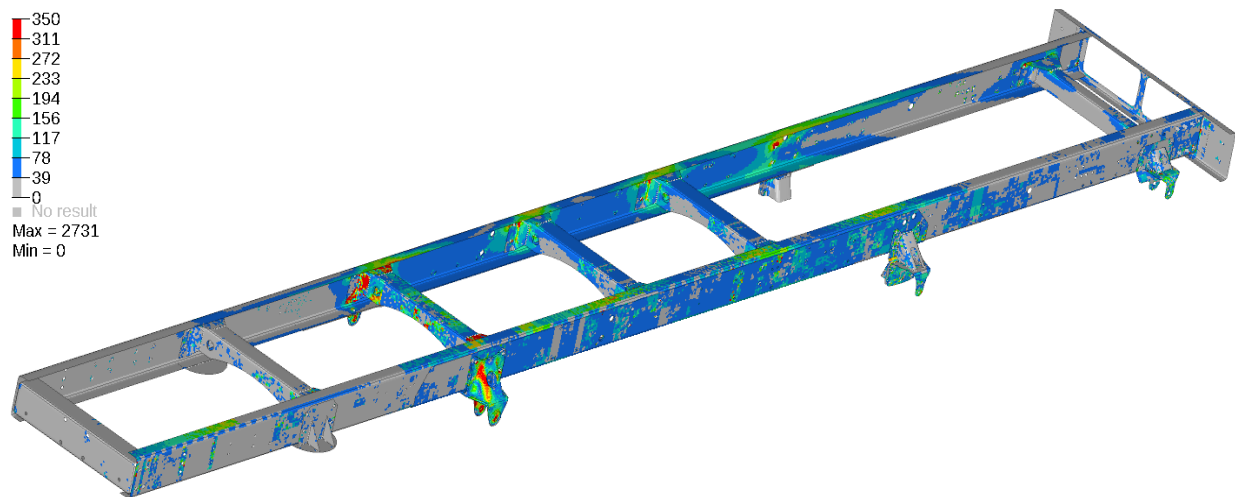
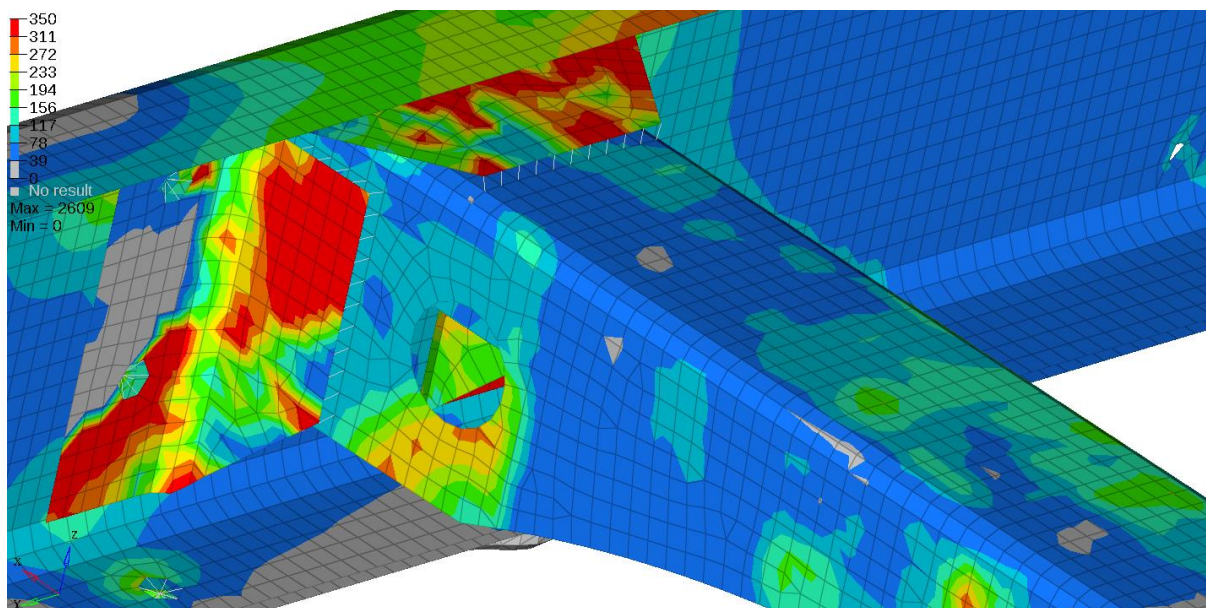


Рис. 9. Распределение перемещений в элементах рамы под нагрузкой, мм



a)



б)

Рис. 10. Вид напряженно-деформированного состояния элементов рамы с локализацией максимальных напряжений, МПа (а) и его увеличенный фрагмент в месте излома (б)

Выводы

Выявлены области максимальных эквивалентных напряжений со значениями, превышающими предел текучести материала. По итогам проведенного моделирования напряженно-деформированного состояния рамы автомобиля сделан вывод: рама не выдерживает штатную максимально допустимую нагрузку по причине завышенных значений напряжений в области исследуемого разрушения конструкции. Данные напряжения проявляются ввиду наличия в ней технологических отверстий под клепки. В рамках всестороннего комплексного исследования причину выхода из строя муфты включения полного привода автомобиля следует отнести к конструктивному отказу (по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования), согласно п. 3.4.19 ГОСТ 27.002-2015 *Надежность в технике*.

Приведенный пример использования моделирования напряженно-деформированного состояния с целью определения причин и условий разрушения рам грузовых автомобилей показал хорошую применимость конечно-элементной методологии, совокупно с другими методами исследования, в практике производства автотехнических экспертиз при доказывании в досудебных и судебных процессах. Его применение позволяет всесторонне, объективно, с меньшими временными и ресурсными (в том числе, денежными) затратами провести экспертизу своевременно, дать объективные и обоснованные выводы о причинах выхода из строя исследуемого объекта. Указанный подход может применяться в технической (автотехнической) экспертизе по выявлению причин разрушения сооружений или конструкций, агрегатов, узлов и отдельных деталей.

Библиографический список

1. **Орлов, Л.Н.** Оценка несущей способности каркаса кузова автобуса по результатам компьютерного моделирования / Л.Н. Орлов, П.С. Рогов, А.С. Васьурин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. Т. 5. С. 150-156.
2. **Россинская, Е.Р.** Судебная экспертиза в гражданском, арбитражном, административном и уголовном процессе / Е.Р. Россинская. – М.: НОРМА, 2006. – 656 с.
3. **Кузьмин, Н.А.** Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации / НГТУ, Н. Новгород, 2002.
4. **Гордеева, Т.А.** Анализ изломов при оценке надежности материалов, М.: Металлургия, 1987.
5. Исследование недостатков легковых автомобилей отечественных моделей, находящихся в эксплуатации. Методическое руководство для экспертов и судей. – М., 2006.
6. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин автотранспортных средств. Методы расчета и оценки. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 218 с.
7. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 35 с.
8. ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. – 50 с.
9. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин. – 5-е изд. – М.: ООО «ТИД «Аз-Book», 2009. – 448 с.
10. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1993. – 35 с.
11. ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 9 с.
12. ГОСТ 15467 – 79. «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения».
13. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».
14. ГОСТ Р 51709-2001 «Автотранспортные средства. Требования к безопасности к техническому состоянию и методы проверки».

15. ГОСТ Р 51814.2 – 2001. «Система качества в автомобилестроении. Анализ видов и последствий потенциальных дефектов».
16. ГОСТ Р 53480 – 2009 «Надежность в технике. Термины и определения».
17. ГОСТ 15.007-81 (Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция легкой промышленности. Основные положения).
18. ГОСТ 9013 – 59 (ИСО 6508 – 86) Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.
19. ГОСТ 30242-97 «Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения».
20. ГОСТ 5640-68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты.
21. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
22. Технический регламент таможенного союза № 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств».