

Кисельков А. Л.¹, Шукюров А. О.¹, Хацкевич А. С.², Насковец А. М.²

УЧЕТ ЖЕСТКОСТИ РАМЫ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПРИ РАСЧЕТЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

1. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь
2. ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», Жодино, Беларусь

Работа посвящена оценке влияния учета жесткости модели в MSCADAMS при выполнении расчета показателей нагруженности и усталостной долговечности на основании динамической нагрузки. Объектом исследования является рама карьерного самосвала. С этой целью проводится моделирование движения самосвала при одинаковых условиях за исключением способа описания рамы в численной динамической модели самосвала. В первом случае принимается абсолютно жесткое поведение рамы, во втором – выполняется учет ее жесткости путем применения модального способа описания упругого поведения конструкции по методу Крейга-Бэмптона. По результатам исследования получено качественное соответствие оценок долговечности для рассматриваемых способов описания рамы самосвала. Продемонстрирована работоспособность предлагаемого расчетного подхода и возможность моделирования нагруженности несущей системы карьерного самосвала без учета жесткости рамы.

Введение. Одной из важнейших задач на стадии проектирования является прогнозирование долговечности изделий. Все производители карьерных самосвалов в документации по технической эксплуатации указывают срок эксплуатации и пробег до списания. В случае навесных деталей и оборудования, а также съемных элементов конструкции имеется возможность замены в процессе эксплуатации. Что касается крупных несущих конструкций, то возможность замены отсутствует. В процессе эксплуатации, с учетом тяжелых условий эксплуатации карьерных самосвалов и огромных пробегов, поломки неизбежны. Поэтому помимо указания срока эксплуатации необходимо определить зоны потенциального разрушения для повышенного контроля во время эксплуатации.

На сегодняшний день наиболее эффективным подходом для решения задач по прогнозированию долговечности изделий в комплексе является компьютерное моделирование. Компьютерное моделирование позволяет на стадии проектирования нового изделия провести ряд виртуальных испытаний в достаточной степени эквивалентных натурным, но при этом со значительно меньшими материальными и временными затратами. Также моделирование, в отличие от натурных испытаний, позволяет получить полную картину протекающих в конструкции процессов, что существенно повышает эффективность принимаемых конструктором решений по совершенствованию конструкции [1–2].

Основная сложность в выработке подходов и методик моделирования заключается в необходимости определения учитываемых и неучитываемых свойств исследуемой системы. Это требует проведения соответствующего комплекса экспериментальных или расчетных исследований по оценке степени влияния рассматриваемого свойства на оцениваемые с помощью разрабатываемой модели характеристики объекта исследования.

Принимая во внимание вышесказанное, проектирование самосвала включает в себя этап оценки долговечности на этапе разработки. Для оценки долговечности, необходимо получить нагрузки на несущие конструкции в результате динамических испытаний. Динамические испытания выполняются в программном комплексе MSCADAMS, на этой

стадии возникает вопрос о необходимости учета жесткости (податливости) рамы, что требует проведения соответствующих исследований, которые могут быть выполнены только расчетным путем. Анализ источников показал некоторый интерес у исследователей при решении подобных задач, например, сравнение учета жесткости при расчете прочностных характеристик робота [3] и манипулятора [4]. Однако, отсутствуют работы по сравнению объектов подобных нашему (рама карьерного самосвала). В связи с этим имеется целесообразность проведения подобных исследований.

Особенность данной работы заключается в исследовании достоверности жесткой модели при выполнении прочностных расчетов данного типа. Использование жесткой модели позволяет сократить время разработки компьютерных моделей, что значительно ускоряет выполнение компьютерных испытаний, особенно при проектировании новых моделей.

Достоверность данной компьютерной модели была подтверждена при сравнении результатов расчетов с поломками при эксплуатации.

Описание методики исследования. Два варианта моделей оценивались по критерию наличия зон с минимальной долговечностью в подконструкциях рамы и количественному соответствию долговечности в сварных соединениях в выявленных зонах с минимальной долговечностью (рис. 1). В основе оценки жесткости конструкции лежит метод Крейга-Бэмптона [5]. В основе метода лежит редуцирование КЭ-модели деформируемого тела путем аппроксимации малых упругих перемещений тела набором допустимых статических форм от единичных перемещений граничных узлов тела и собственных форм колебаний при закрепленных граничных узлах. Модели детально описывают основные масса-инерционные, кинематические, упругие и демпфирующие характеристики реального объекта [5].

Нагрузки на несущие конструкции карьерного самосвала формируются при движении по дорогам карьера в результате взаимодействия колес с неровностями дороги и вызванных этим взаимодействием динамических колебаний подрессоренных и непрессоренных масс. Величина возникающих при этом нагрузок зависит от параметров микро- и макропрофиля дороги, скорости движения транспортного средства, массы перевозимого груза, упругих и демпфирующих характеристик подвески и шин, компоновочных параметров и т. п.

В результате расчета были получены показатели обобщенной долговечности и долговечность сварных соединений по методу VOLVO. Проведен анализ полученных результатов.

Объектом исследования в данной работе является рама карьерного самосвала.

Исходная геометрическая модель. Исходные данные по геометрии объекта исследования представлены конструкторской трехмерной твердотельной геометрической моделью рамы самосвала (рис. 2). Исходная геометрическая модель передана в нейтральном формате, в нашем случае parasolid в CAD-пакет для последующей подготовки к расчету.

Подготовка геометрической расчетной модели. На данном этапе выполнено упрощение геометрии путем удаления элементов конструкций, которые не оказывают влияния на прочность и жесткость конструкции и, следовательно, на результаты виртуальных испытаний.

Полностью подготовленная расчетная геометрическая модель представлена на рис. 3.

Разработка конечно-элементной модели. Разработка КЭ модели выполнялась в ПО ANSYSWorkbench [1; 2]. В качестве модели, описывающей поведение материала для всех элементов конструкций, использована линейная изотропная модель с упругими свойствами конструкционной стали: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$ и величиной плотности $\rho = 7850$ кг /м³, необходимой для учета нагрузок от собственного веса конструкций.

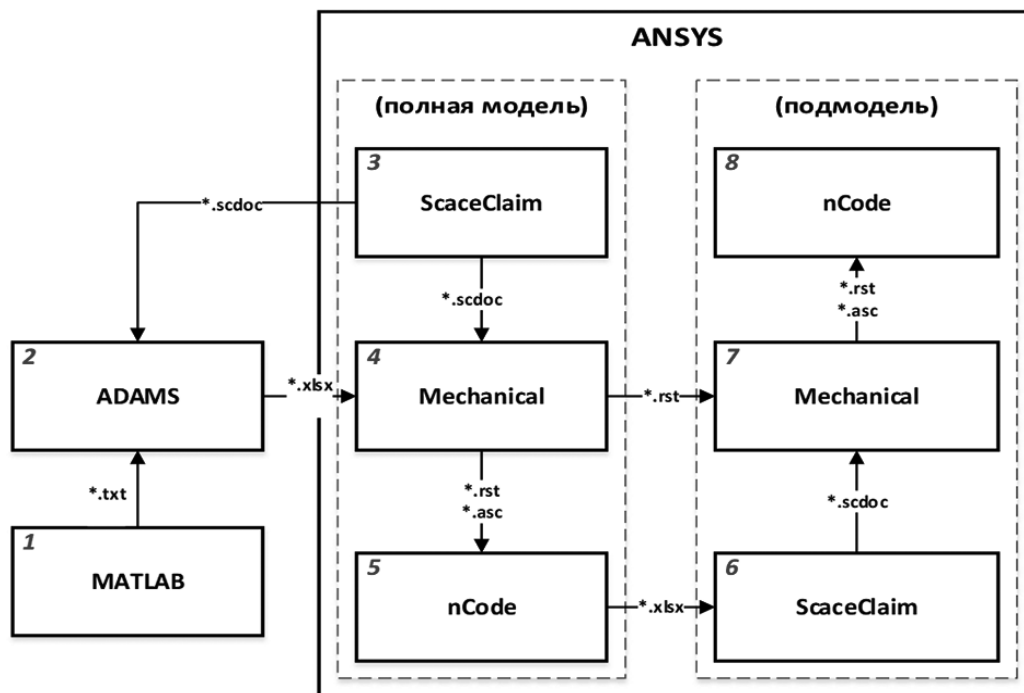


Рис. 1. Алгоритм проведения виртуальных испытаний

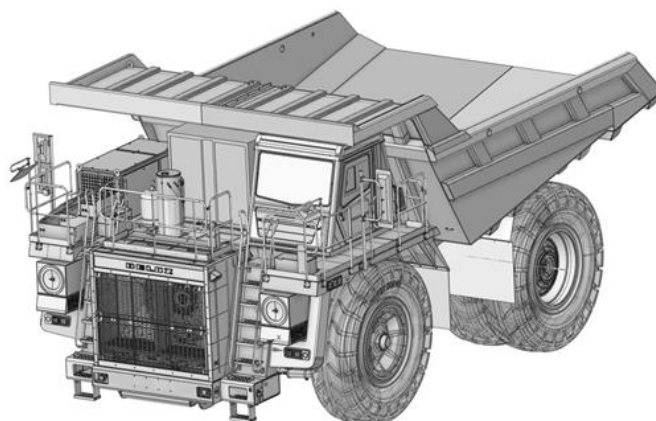


Рис. 2. Компьютерная конструкторская твердотельная геометрическая модель рамы карьерного самосвала

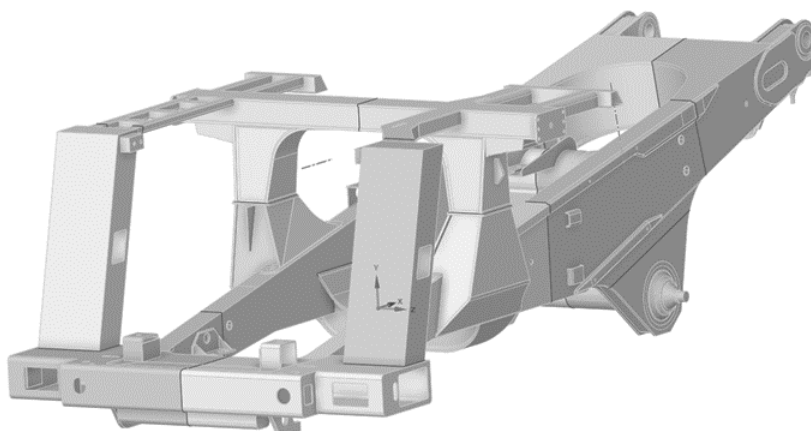


Рис. 3. Трехмерная геометрическая расчетная модель рамы карьерного самосвала

С учетом особенностей динамики колебаний карьерного самосвала и его систем на рассматриваемых нагрузочных режимах была выбрана частота следования ординат равная 10 Гц. Это значение позволяет с достаточной точностью описать амплитуды нагрузок, действующих на раму самосвала, а также обеспечить приемлемую трудоемкость и длительность вычислений. По результатам расчета показателей.

Полученная таким образом полная КЭ модель рамы состоит из 843 987 элементов, соединенных между собой в 1 511 680 узлах. Средний размер конечных элементов составляет 25 мм. В местах наличия конструктивных элементов малых геометрических размеров расчетная сетка сгущалась для корректной оценки концентрации напряжений и расчета градиентов напряжений – рис. 4.

Гибкая модель в MSCADAMS основана на конечно-элементной модели из ANSYS, жесткая модель получена блокировкой переданных в mnf-файле мод колебаний.

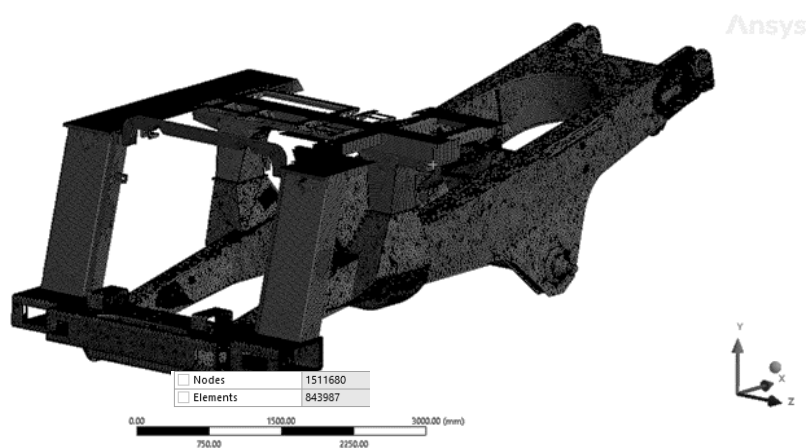


Рис. 4. Конечно-элементная модель рамы

Задание сценария нагружения и граничных условий. В качестве режимов нагружения рассмотрены расчетные случаи, которые ранее были выделены в процессе декомпозиции технологического пути карьерного самосвала [6]. Участки технологического пути представляют собой типовые участки маршрута движения самосвала. Основные участки представляют собой движение по прямой, в поворотах, спуски, подъемы, а также переходные режимы. История перемещений в точках согласования задавалась в качестве граничных условий в результате расчета в MSCADAMS.

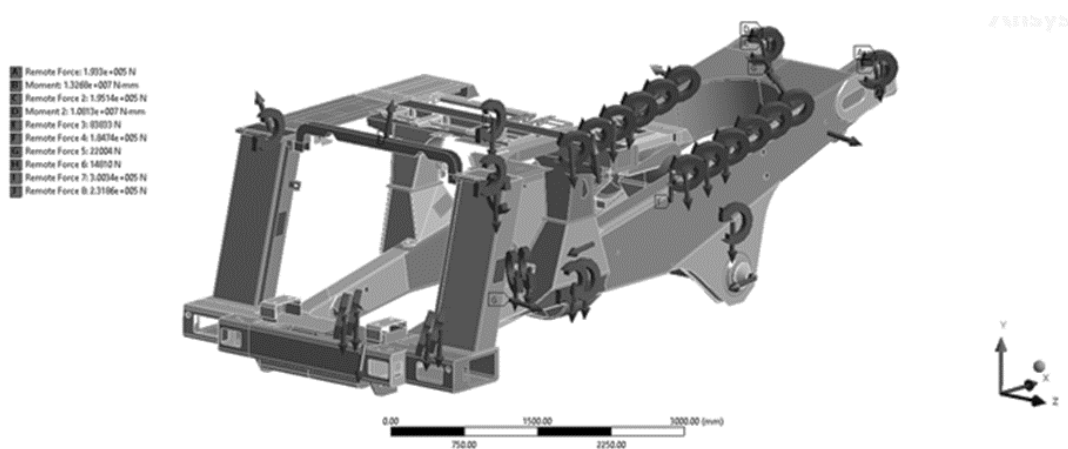


Рис. 5. Инерционные силы и моменты, приложенные к модели рамы самосвала

Анализ результатов моделирования. На данном этапе визуально по распределениям НДС и графикам напряжений выполнена валидация моделей и оценка зон локализации напряжений. Поскольку при движении карьерного самосвала по технологическому пути локализация зон напряжений может значительно меняться, то наиболее наглядным представлением зон с наибольшей повреждаемостью является представление в интегральном виде [6]. На рис. 6 изображено качественное сравнение жесткой и гибкой модели рам. На рис. видно высокое качественное совпадение распределения долговечности по моделям.

Определены сравниваемые зоны подмоделирования для количественного сравнения двух моделей, жесткой и гибкой рамы.

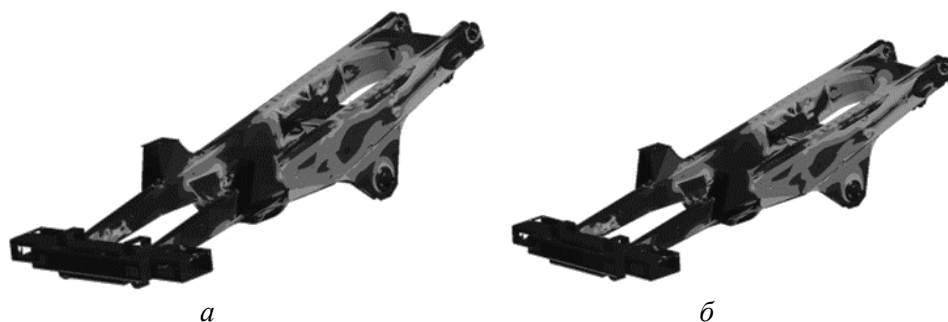


Рис. 6. Качественное сравнение накопленных повреждений в интегральном виде:
а – гибкая рама; б – жесткая рама

Подготовка выделенных зон. На данном этапе выполнена подготовка геометрических и конечно-элементных моделей для использования технологии подмоделирования с целью более детального исследования наиболее нагруженных элементов конструкций и описания сварных соединений (рис. 7). Подготовлены зоны, определенные по результатам расчета обобщенной долговечности. На рис. 8 изображены подготовленные геометрические модели исследуемых наиболее нагруженных фрагментов рамы, на основании которых разработаны соответствующие детализированные конечно-элементные модели (рис. 9).

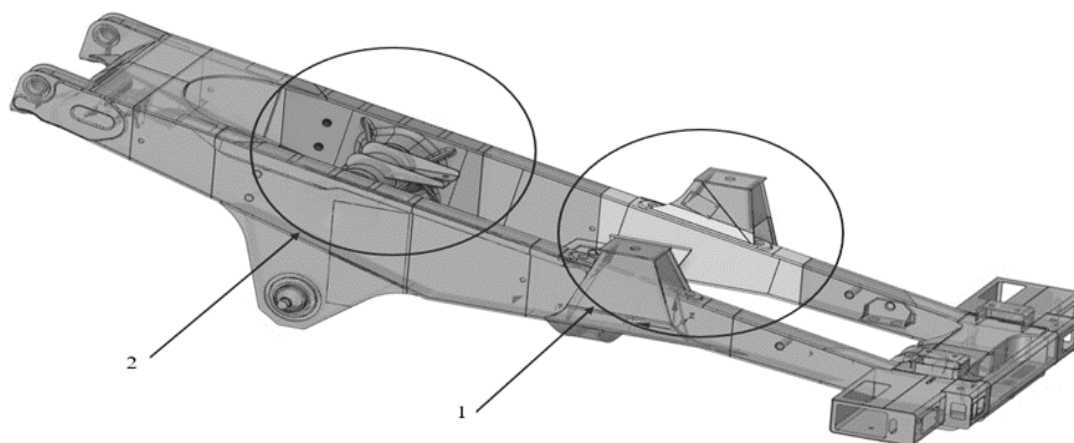


Рис. 7. Выделенные для детального анализа фрагменты конструкции рамы (подмодели):
подмодели зон 1 и 2

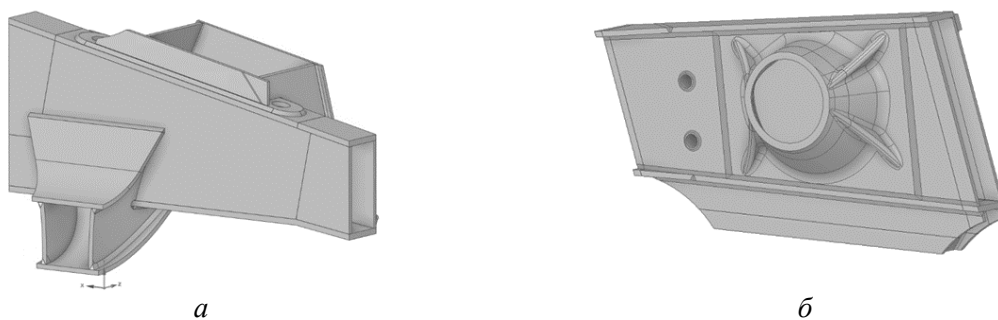


Рис. 8. Геометрия подмодели:
a – первая подмодель; *б* – вторая подмодель (другим цветом указаны смоделированные сварные швы согласно картам сварных соединений)

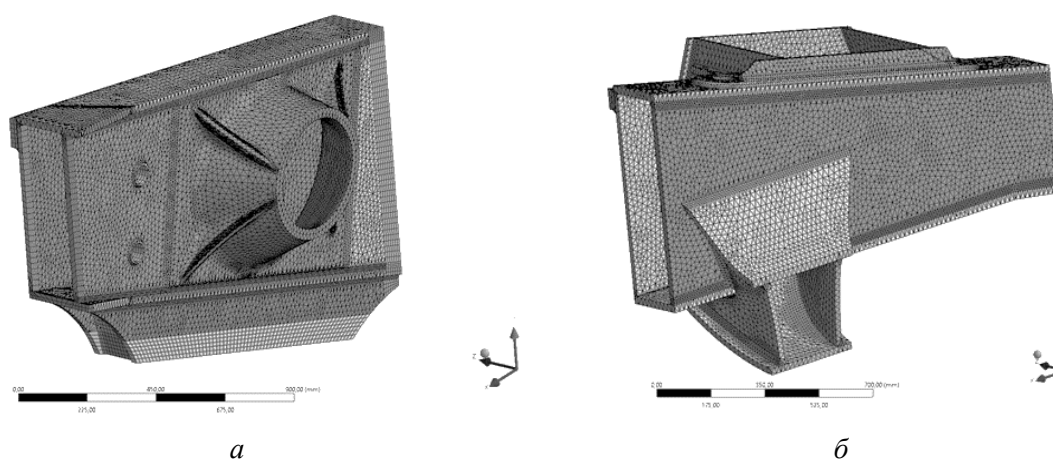


Рис. 9. Конечно-элементные подмодели исследуемых фрагментов конструкции рамы:
a – первая подмодель; *б* – вторая подмодель

На рис. 10 изображены конечно-элементные модели исследуемых подмоделей рамы. Конечно-элементная модель первой подмодели содержит 591 382 узла и 383 997 элементов второго порядка, вторая подмодель содержит 306 890 узлов и 161 270 элементов второго порядка.

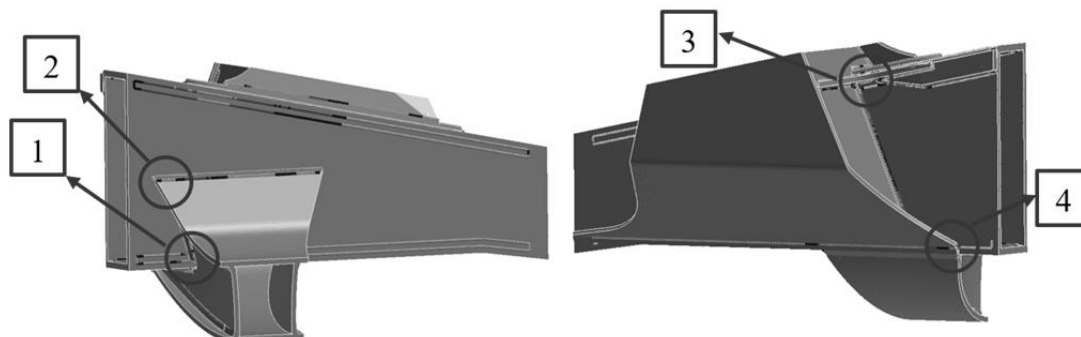


Рис. 10. Принятые для сравнения зоны с минимальной долговечностью, первая подмодель

Импорт истории перемещений из общей модели, расчет и анализ результатов.

На данном этапе выполнен импорт истории перемещений из общей модели, расчет прочности для каждого режима отдельно и дальнейший расчет долговечности по методу VOLVO для двух вариантов исполнения модели (жесткая и гибкая). Подробно данный процесс описан в [6]. Остановимся на анализе результатов расчета долговечности по методу VOLVO. На рис. 10–11 изображены результаты расчета долговечности первой и второй подмодели по методу VOLVO при использовании жесткой и гибкой рамы. Данные по долговечности по всем зонам исследуемых подмоделей изображены на гистограмме (рис. 12) и в табл. 1.

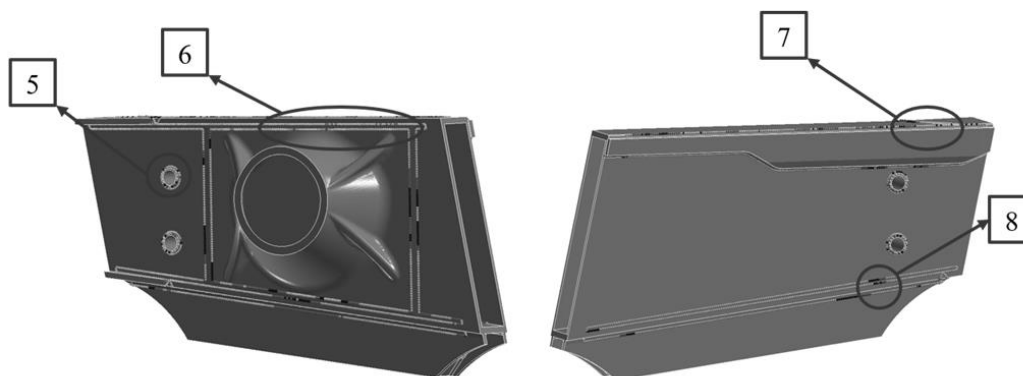


Рис. 11. Принятые для сравнения зоны с минимальной долговечностью, вторая подмодель

Таблица 1 – Результаты минимальной долговечности до зарождения трещины для подмоделей при использовании гибкой и жесткой рамы

№ зоны	Долговечность с жесткой рамой, км	Долговечность с гибкой рамой, км	Совпадение, %
1	4259	4400	97
2	6582	4400	150
3	3476	4400	79
4	4365	4400	99
5	2134	4400	49
6	2666	4400	61
7	2504	4400	57
8	5412	4400	123

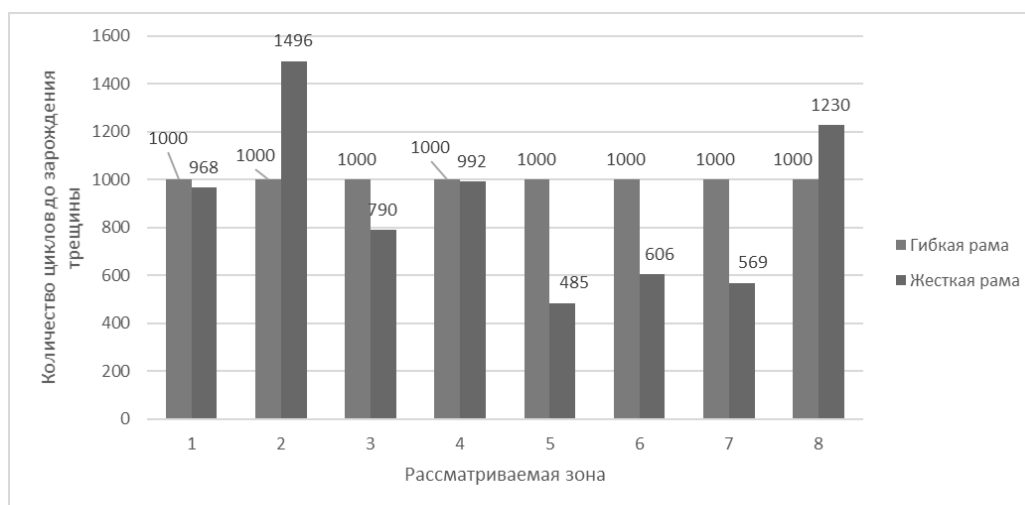


Рис. 12. Сравнение долговечности в циклах для подмоделей по методу VOLVO

Заключение. При выполнении расчета долговечности учет жесткости динамической модели сильно увеличивает трудоемкость подготовки моделей рамы. На примере описанного объекта исследования время разработки моделей составило примерно 10–15 рабочих дней, в зависимости от модели транспортного средства и квалификации исполнителя. Так же для гибкой модели рамы, требуется выполнение полноценного расчета собственных частот и форм колебаний. Кроме того, требуются дополнительные временные ресурсы в сравнении с жесткой моделью.

Выполненная оценка влияния учета жесткости рамы карьерного самосвала на показатели ее нагруженности и усталостной долговечности позволила получить следующие основные результаты.

В результате динамического расчета, различия усилий в кронштейнах крепления подвески достигали 40 %, ввиду особенностей динамических расчетов, а также огромного объема информации, закономерность различия установить не удалось, так как, в зависимости от момента времени усилия, отличались в большую или меньшую сторону.

По результатам расчета отличия НДС для полной модели достигают 40 %, сложность сравнения аналогична сравнению динамического расчета, большое число данных и не равномерный разброс. В связи с этим делаем вывод о том, что корректно выполнять сравнение можно по показателям долговечности сварных соединений по методу VOLVO.

Результаты расчета показали, что использование жесткой модели при передаче нагрузок из MSCADAMS в ANSYS, т. е. применение жесткой модели при расчете долговечности по методу VOLVO занижает долговечность на 10 %. В большинстве случаев при использовании гибкой рамы расчетная долговечность выше. Максимальный разброс составляет до 50 %. Так же, сделан вывод об удобстве выполнения сравнения путем сравнения долговечности. Ввиду большого количества данных и большого разброса в целом, достоверно сравнить динамическую модель путем расчета НДС не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов К. А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с., ил.
2. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – Изд. 2-е, испр. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.
3. Tarun Mallikarhuna Rao. Modelling and simulation research concept Vehicle using MBD-FEM approach // Master of Science Thesis MMK. – Stockholm, Sweden, 2015.
4. Haitao Luo, Jia Fu, Tingke Wu. Rigid-Flexible coupled dynamics analysis of 3-revolute-prismatic-spherical parallel robot based on multi-software platform // Advances in Mechanical Engineering. – Shenyang, China, 2019.
5. Бойков В. Г. Моделирование движения механической системы, состоящей из деформируемых упругих тел, путем интеграции двух пакетов: EULER и FIDESYS / И. В. Гаганов, Ф. Р. Файзуллин, А. А. Юдаков // Чебышевский сборник. – Т. 18, выпуск 3. – 2017. – С. 131–153.
6. Шляжко, С. А. Сравнительная оценка усталостной долговечности вариантов конструкции рамы карьерного самосвала методами компьютерного моделирования / С. А. Шляжко, Э. В. Лисовский, П. С. Литвинюк, А. Л. Кисельсков, А. М. Насковец // Актуальные вопросы машиностроения. – 2021. – № 10. – С. 207–216.

Поступила 02.11.2023