

# РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДНЕЙ СЕКЦИИ РАМЫ КУЗОВА



**Н**еобходимость в исследованиях, о которых мы расскажем в этой статье, диктовалась несколькими обстоятельствами. Конструктивные особенности проектируемого пассажирского электровоза ЭП2К потребовали применения принципиально новой схемы передачи продольных сил: тяги, торможения и инерционных сил. Как следствие, понадобилась существенная переработка конструкции средней секции рамы (рис. 1).

Для выбора оптимального конструктивного решения требовался ана-

лиз напряженно-деформированного состояния (НДС) этой секции при воздействии на нее инерционных сил (порядка 98 тс), возникающих при ударе со стороны каждой из тележек, исходя из их ускорения вдоль оси пути, равного  $3g$ .

Как следует из аналитического расчета (рис. 2), силы в поперечной и распорной тягах должны взаимно компенсировать друг друга,

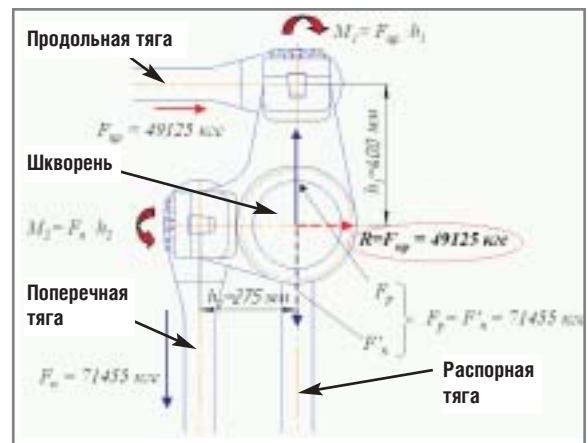


Рис. 2. Схема сил, действующих на шкворень при ударе

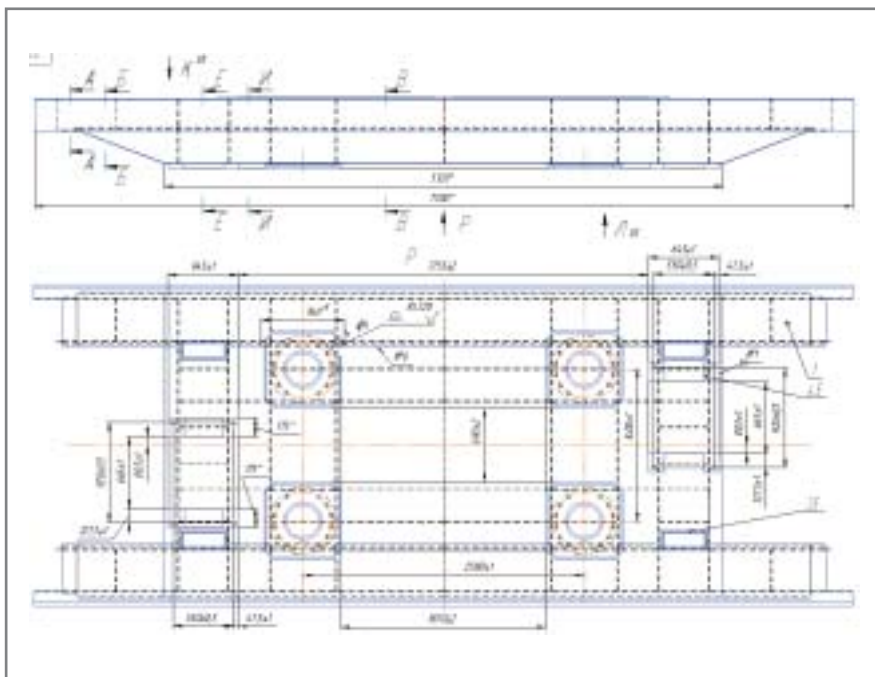


Рис. 1. Чертеж средней секции рамы кузова

при этом на шкворень будет передаваться только продольная сила.

В реальности на распределение усилий в тягах существенное влияние оказывает податливость всех элементов конструкции, задействованных в передаче нагрузок. Разумеется, аналитической выполнить подобный силовой расчет с приемлемой степенью точности не представляется возможным.

Для оценки НДС узла бюро расчетов прочности получило задание выполнить соответствующий анализ. Работа осложнялась тем, что на данном этапе проекта отсутствовали полная конструкция рамы и всего кузова в целом — имелись только проработки стадии технического проекта. Поэтому для уточненного расчета усилий в распорных тягах и анализа НДС секции в пре/постпроцессоре MSC.Patran была разработана расчетная конечно-элементная модель этой

# НОВОСТИ

## Разработка авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок — специалисты NASA рекомендуют MSC.Nastran

Испытания по роторной динамике — одно из важнейших условий обеспечения работоспособности и безопасности не только газотурбинных двигателей, но и летательных аппаратов в целом. Столь же очевидно, что для моделирования роторной динамики сегодня уже невозможно обойтись без современных компьютерных программ. До недавнего времени разработкой таких программ занимались сами конструкторы авиадвигателей — неудивительно, что об универсальности и возможностях быстрой передачи расчетных моделей и данных между заказчиками и исполнителями не могло быть и речи.

Эти проблемы были решены с появлением универсальной программы по расчету роторной динамики **MSC.Nastran**, обеспечивающей:

- анализ установившихся и переходных динамических процессов на основе как упрощенных массово-стержневых моделей, так и подробных 3D-моделей;
- исследование спектров собственных частот и форм колебаний отдельных деталей и узлов с анализом распределения относительных напряжений при колебаниях по собственным формам. Построение диаграмм Кемпбелла;
- построение математических моделей динамического поведения многороторных двигателей с учетом нелинейных характеристик опор, включающих исследования критических частот вращения роторов, анализ условий возникновения и параметров прямой и обратной прецессий;
- изучение реакций на обрыв лопаток и касание ротора о статор.

Последняя из перечисленных возможностей особенно важна, поскольку при обрыве лопаток может быть пробит корпус двигателя, а кроме того возникают дисбалансы, угрожающие разрушением не только двигателю, но и всему летательному аппарату. Поскольку проведение реальных физических испытаний подразумевает разрушение конструкции, в случае неудачи эксперимент необходимо повторить и, соответственно, изготовить для этого новый двигатель. В любом случае это очень

секции, включающая следующие основные элементы (рис. 3):

- конструкция средней секции и шкворни, состоящие из оболочечных элементов;
- отсутствующая часть рамы, смоделированная до центров опор подвески кузова балочными элементами, имеющими жесткостные и инерционные характеристики соответствующих сечений

рамы согласно техническому проекту (при этом балочные и оболочечные части конструкции были соединены между собой по центрам тяжести стыковых сечений уравнениями связи, обеспечивающими совместную деформацию этих частей).

Механизм передачи сил тяги, торможения и инерционных моделировался из балочных (поперечные и

распорные тяги) и оболочечных (двуплечие рычаги) элементов, включая соответствующие шарниры и осевые подшипники рычагов. К рычагам механизма были приложены продольные инерционные силы: 49 тс на каждый рычаг.

Закрепление расчетной модели осуществлялось по концам балочных сечений, соответствующих расположению опор кузова. Такая гибридная расчетная схема позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам компьютера и одновременно исключить влияние закреплений на НДС анализируемой секции кузова.

Все листы средней секции изготавливаются из стали марки 09Г2С (предел текучести  $\sigma_T=3250$  кгс/см<sup>2</sup>), шкворни — из осевой стали ГОСТ 4278-89 ( $\sigma_T = 3500$  кгс/см<sup>2</sup>). Допускаемые напряжения для аварийного режима не должны превышать 0,9  $\sigma_T$ .

После решения задачи средствами комплекса **MSC.Nastran** оказалось, что на распорную тягу приходится чуть более 50% нагрузки, полученной аналитически: 39,3 тс вместо 71,5 тс (рис. 4). Следовательно, оставшуюся часть поперечной силы (32,2 тс) воспринимает шкворень.

В итоге суммарная нагрузка на каждом шкворне более чем на 9 тс превысила проектную (58,7 тс вместо 49 тс), изменилось направление ее вектора (под углом  $\approx 33^\circ$  к продольной оси электровоза). Результаты анализа показали следующее:

- требуется пересмотр топологии ребер жесткости

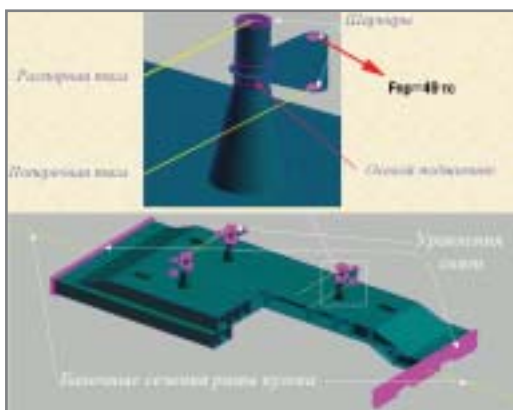


Рис. 3. Расчетная конечно-элементная модель секции рамы

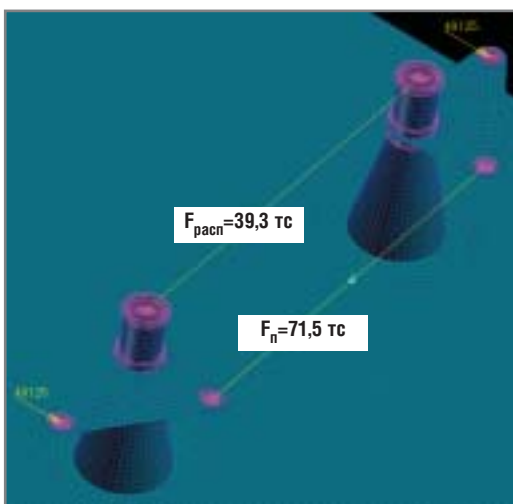


Рис. 4. Усилия в распорной и поперечной тягах, полученные при расчете средствами комплекса **MSC.Nastran**

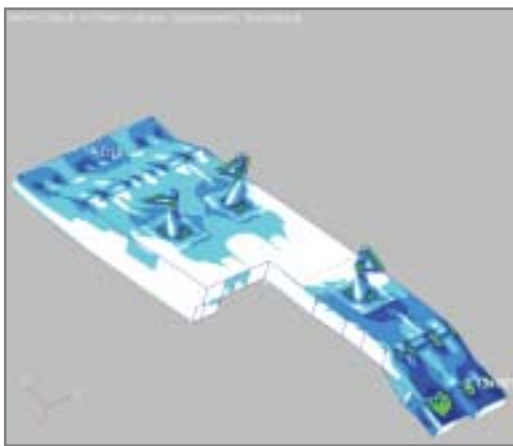


Рис. 5. НДС средней секции рамы кузова



## НОВОСТИ

в местах крепления шкворней — с учетом отклонения вектора нагрузки;

- хотя основной уровень напряжений не превышает допустимых, нельзя достоверно оценить этот уровень в сварных швах приварки шкворневой плиты к нижним листам секции рамы. Поэтому для более детального анализа данной конструкции необходимо рассмотреть схему "средняя секция — шкворень" в 3D-постановке с моделированием зоны сварных швов;
- уровень напряжений в средней части секции (между шкворнями) очень мал, что говорит об избыточной жесткости сечения, следствием чего является избыточная масса узла.

Для уточненного расчета НДС наиболее нагруженной зоны средней секции рамы (рис. 5) — в местах расположения шкворневых узлов — была разработана подробная расчетная модель фрагмента секции (с учетом поперечной симметрии). Эта модель показана на рис. 6.

Шкворень и шкворневая плита представлены в модели как единое целое, поскольку их шпильное крепление не должно раскрываться под нагрузкой. Плита крепится к средней секции сваркой (моделируется катет сварного шва шириной 8 мм). Полная нагрузка на шкворень задавалась в соответствии с результатами предыдущего расчета.

Расчеты с использованием комплекса MSC.Nastran показали, что напряжения на нескольких участках сварных швов значительно превосходят допустимые, поскольку жесткость конструкции по периметру сварных швов недостаточна. Превышение уровня напряжений отмечено в вертикальных листах под шкворнем (рис. 7).

По результатам последовательных вариантов расчетов конструк-

торы отдела кузовов и кабин оптимизировали силовую схему средней секции. В окончательном варианте (рис. 8) была изменена топология ребер жесткости в районе шкворневой плиты и существенно облегчена центральная часть конструкции, а также ее торцевые части и обносной профиль. Расчеты центральной части, произведенные с теми же нагрузками, позволили сделать вывод, что напряжения не превышают допустимых (рис. 9), обеспечен необходимый запас прочности секции при воздействии на нее аварийных ударных нагрузок. При этом масса средней секции рамы снижена более чем на тонну.

Окончательные итоги:

- в ходе проведенных исследований отработана методика создания и применения гибридных расчетных моделей, позволяю-

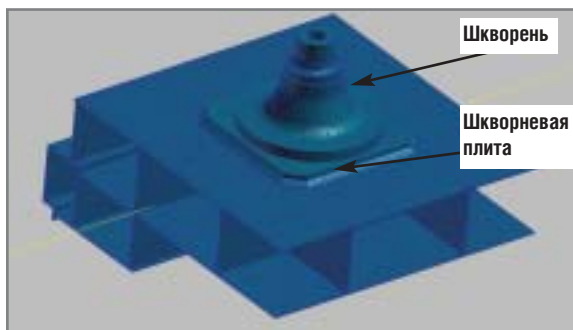


Рис. 6. Конечно-элементная модель фрагмента секции рамы

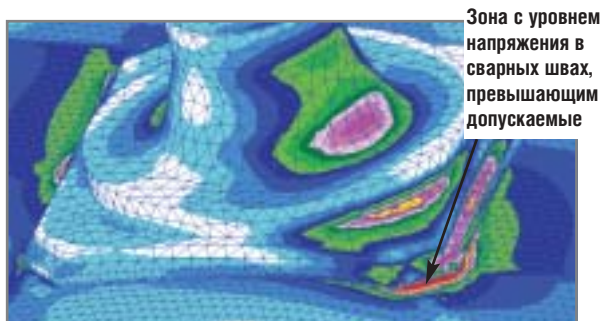


Рис. 7. НДС детализированного фрагмента секции

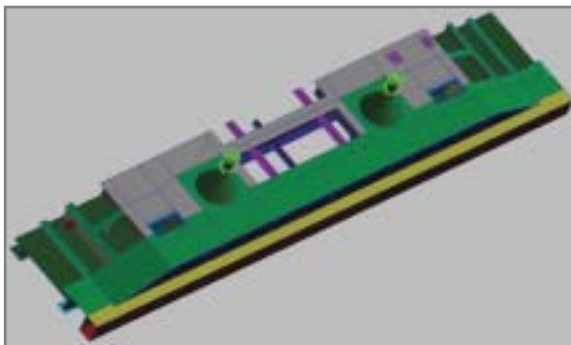


Рис. 8. Оптимизированная конструкция средней секции

продолжительные и дорогостоящие испытания, требующие десятков миллионов долларов. Единственной альтернативой становится применение компьютерных технологий.

Обрыв лопатки — процесс чрезвычайно сложный. Зачастую сначала отрывается лишь один фрагмент, через некоторое время — другие, после чего начинается обрыв фрагментов смежных лопаток. При этом может меняться скорость ротора, вызванная отключением двигателя.

Большинство из существующих компьютерных систем не в состоянии предусмотреть все эти факторы, позволяя при моделировании эффекта обрыва лопатки учитывать присутствие лишь единичной несбалансированной массы. Единственной программой, обеспечивающей решение таких задач, является MSC.Nastran.

Возможности MSC.Nastran высоко оценили сотрудники NASA (National Aeronautics and Space Administration), которая с момента основания тесно сотрудничает с разработчиками двигателей и планеров. Вот мнение представителей NASA:

"Glenn Research Center NASA осуществляет широкую программу экспериментов по микрогравитации. Инструменты роторной динамики MSC.Nastran предоставляют возможность эффективно моделировать возбуждения конструкции экспериментальной установки в процессе полета, будь то космический корабль или исследовательская лаборатория на борту специального самолета, выполняющего микрогравитационный маневр. MSC.Nastran позволяет определять нагрузки, возникающие в процессе маневра, обеспечивая достоверность проводимых экспериментов".

"MSC.Nastran — единственная в мире система, позволяющая производить весь спектр необходимых расчетов. Специалисты NASA провели тщательное тестирование аппарата роторной динамики MSC.Nastran. Результат превзошел все наши ожидания: соответствие полученных результатов положениям теории было поразительным. Появление MSC.Nastran — огромный шаг вперед в такой чрезвычайно важной области проектирования самолетов, как моделирование роторной динамики".

По материалам "Alfa Magazine" №4/2005

# НОВОСТИ

## Моделирование технологических процессов формования стеклянных изделий с помощью MSC.Marc 2005

Массовое производство изделий предъявляет особые требования к их конструкции. В частности, экономия даже нескольких десятков граммов материала на каждой единице продукции, выпускаемой миллионными партиями, обеспечивает колоссальный экономический выигрыш. По той же причине принципиально важное значение приобретает оптимизация конструкции.

Новые, расширенные возможности MSC.Marc 2005 позволяют эффективно решать задачи оптимизации конструкции стеклянных бутылок. При этом форма и толщина стенок бутылки могут оптимизироваться как в плане восприятия изделием рабочих нагрузок, так и с точки зрения технологических процессов его изготовления.

Возможность глобального автоматического переразбиения конечно-элементной сетки модели в процессе формования обеспечивает качественную форму элементов на всех этапах расчета. Для каждой такой новой конечно-элементной сетки автоматически пересчитываются закрепления и давление формования.

Материалом стекла является жидкость с температурно-зависимыми вязкостными свойствами. Следовательно, она может быть представлена как несжимаемый вязко-пластический материал.

Проектными переменными в такой связанной термомеханической задаче являются форма и толщина бутылки, а также распределение температур. Компьютерное моделирование процесса формования позволяет обеспечить качественную (без капель и неоднородностей) форму изделия. Кроме того, может быть подобран такой технологический процесс, который обеспечит оптимальную толщину стенок бутылки.

Принципиально важно, что отладка технологического процесса происходит не путем дорогостоящих и длительных натурных испытаний, а с помощью эффективного компьютерного моделирования. При этом могут быть учтены многочисленные нюансы технологического процесса.

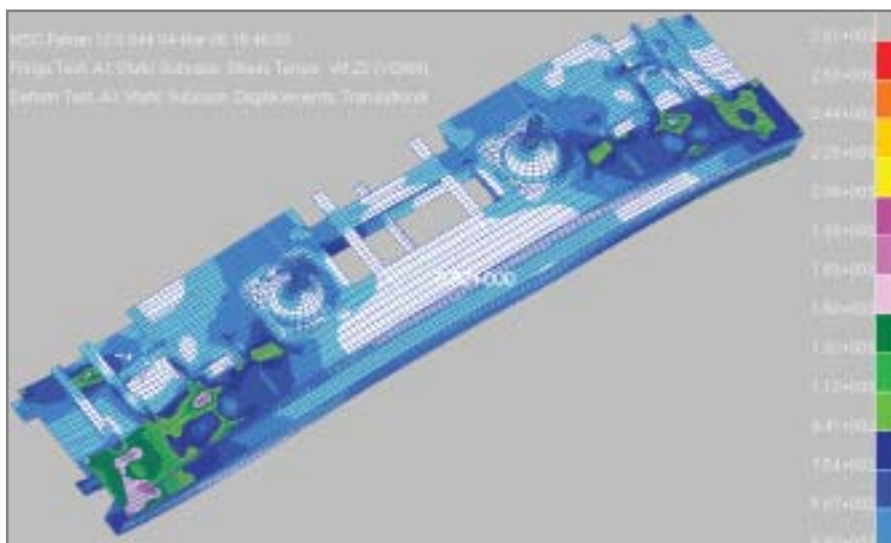


Рис. 9. НДС оптимизированной конструкции средней секции

- в них оперативно выполнять анализ конструкций с учетом шарнирно-упругих связей, а также взаимодействия со смежными элементами конструкций, которые на момент расчета еще не проработаны детально;
- уточнены нагрузки на шкворни и направление векторов равнодействующих сил. Использование данных по нагрузкам, полученных при аналитическом расчете, могло бы привести к остаточным деформациям рамы кузова и разрушению сварных швов при испытаниях электровоза на соударение;
- оптимизирована конструкция средней секции: максимальные напряжения — ниже допустимых, масса узла по сравнению с исходным вариантом снижена на 27,7%.

В заключение нужно сказать, что создание столь наукоемкой и технически сложной продукции, как теп-

ловозы и электровозы, невозможно без использования специальных инструментальных средств инженерного анализа. Все этапы проектирования, изготовления опытных образцов и их доводки требуют решения множества сложнейших задач из области динамики, прочности и долговечности изделий. От успешного решения таких задач зависят как основные эксплуатационные характеристики изделий, так и уровень затрат на изготовление и доводку опытных образцов, а также сроки вывода новых изделий на рынок.

Современный уровень рентабельности производства требует сократить основную составляющую затрат цикла "проектирование — сертификация": расходы на доводку и устранение дефектов проекта. По данным корпорации "Боинг" (рис. 10), объем этих затрат составляет сегодня около 73%.

Ведущие западные компании, стремясь существенно снизить подобные затраты, отводят в этом решающую роль именно интенсивному применению технологий инженерного анализа...

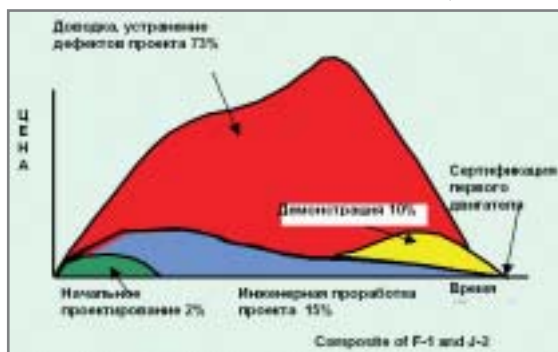


Рис. 10. Диаграмма затрат цикла "проектирование — сертификация" (по данным корпорации "Боинг")

Владимир Савочкин,  
начальник бюро расчетов  
прочности  
Алексей Свищук,  
инженер-конструктор  
ОАО "Коломенский завод"  
Тел.: (0966) 13-8427  
E-mail: sofiflab@kolomna.ru