

Численные методы моделирования

УДК 629.1.02

DOI: 10.14529/engin230207

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА СИЛОВОГО КАРКАСА КВАДРОЦИКЛА

Н.В. Далида¹, С.Н. Зыков², Н.М. Филькин³

¹ АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг», г. Ижевск, Россия

² ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск, Россия

³ ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова», г. Ижевск, Россия

Проектирование конструкции квадроцикла является сложной комплексной инженерной задачей, где разработка силовой несущей рамы является одной из приоритетных, что требует системной методологии. Сугубо аналитические подходы к расчетам, результаты которых могут использоваться при разработке объемной трубчатой рамной структуры, в настоящее время уходят в прошлое, поскольку применяемые в аналитических методах допущения дают существенную расчетную погрешность, что позволяет получить лишь очень приближенную картину распределения напряжений и возникающих деформаций конструкции. Также необходимо учесть, что современные технологии проектирования предусматривают одновременное применение разнообразных профилей не только круглого, но и более сложного сечения, что должно обеспечивать необходимую функциональность разных участков рамы (при обеспечении достаточно большого количества конструктивных требований, предъявляемых к ней), но существенно усложняет расчетные процедуры. При таких вводных данных предварительное виртуальное электронное моделирование реальных изделий в сочетании с последующим численным инженерным анализом является оптимальным и позволяет учесть различные конструктивные и технологические нюансы. Такие программные комплексы, как CATIA, относящиеся к PLM-системам (PLM – англ. product lifecycle management system), дают возможность в рамках единой интерактивной среды производить как моделирование изделий, так и, собственно, серию численных экспериментов. В условиях реального проектирования на производственных мощностях такие работы являются методологически не освоенными и новаторскими. Целью статьи является рассмотрение подходов к оптимизации конструкции силовой рамы квадроцикла с использованием программных компьютерных средств инженерного анализа и предварительно созданной электронной геометрической модели квадроцикла. В частности, затрагиваются вопросы подготовки модели для последующего конечно-элементного разбиения, оценки результатов численного исследования применительно к оценке работоспособности проектируемого силового каркаса квадроцикла в условиях использования компонентной базы ранее разработанных силовых рам мотоциклов и багги.

Ключевые слова: квадроцикл, силовая рама, прочностной анализ, численный эксперимент.

Материалы и методы

Силовой каркас является одним из важнейших элементов транспортного средства (ТС), отвечающих за его заявленные эксплуатационные характеристики. Большинство рам для квадроциклов, трициклов, мотоциклов, багги и прочих подобных ТС представляют собой набор соединенных различным способом труб. Такая особенность обусловлена конструктивно-технологическими и экономическими причинами. Каркас из трубного проката является достаточно дешевым и доступным и при этом удовлетворяет таким критериям, как легкость, прочность, технологичность изготовления. Заготовки труб режут, придают определенную форму на гибочных станках, соединяя их впоследствии при помощи сварки, а также другими способами. При всей кажущейся лаконичности конструкции большинство рам квадроциклов имеют сложную пространственную геометрию, что предполагает наличие значительных трудностей в оценке локальных напряжений и деформаций в отдельных узлах и местах соединений, которые возникают под воздействием заданных эксплуатационных нагрузок.

Пространственная геометрия трубчатых рам трицикла, квадроцикла и баги в общем случае, как правило, являются расширенной функциональной вариацией «мотоциклетной» рамы. Такой конструкторский подход важен с экономической и потребительской (сервисной) точек зрения: детали и технические узлы различных ТС должны иметь определенную степень унификации деталей и узлов, что удешевляет процесс производства всей номенклатуры ТС. При этом расширение конструктивного функционала силового каркаса от мотоцикла до уровня трицикла, или квадроцикла, или баги достигается за счет присоединения к модифицированной базовой раме дополнительных силовых элементов, соответствующих типу ТС. Такая объемная модификация силового каркаса преследует две главные цели: создать условия для компоновки узлов и механизмов в зависимости от типа ТС, а также обеспечить необходимые прочностные характеристики при действии рабочих нагрузок.

Общая конструкция деталей и узлов мотоциклов и квадроциклов в достаточной мере типична для многих моделей, так же, как и типичны принципы проектирования силовых рам ТС, включая инженерный анализ [1–6]. На современном этапе развития вычислительной техники и специализированного программного обеспечения проведение большого количества натуральных экспериментов при каждой модификации силового каркаса является нецелесообразным. Компьютерная трехмерная виртуальная модель трубчатого каркаса в комбинации с численным прочностным анализом состояния конструкции под действием рабочих нагрузок позволяют проводить практически безграничное количество виртуальных модификаций силового каркаса до получения желаемых прочностных характеристик. На рис. 1 представлена схема использования численного анализа для принятия оптимальных решений в отношении конструкции каркаса квадроцикла.



Рис. 1. Схема использования численного анализа для определения прочностных характеристик рамной конструкции силового рамы

Численные методы моделирования

Исходя из приведенной схемы, можно видеть, что данные работы начинаются одновременно по двум направлениям (I–II). Во-первых, необходимо проанализировать имеющиеся технологические возможности предприятия и конструкторско-технологический задел, который сформировался при проектировании и производстве аналогичной продукции в прошлом. Во-вторых, необходимо принять окончательное компоновочное решение о силовой раме в соответствии с выставляемыми требованиями по размещению узлов и механизмов, а также в соответствии с эргономическими характеристиками, поскольку с некоторыми элементами рамной конструкции человек-пользователь будет взаимодействовать непосредственно. В-третьих, необходимо определиться с составом узлов и оборудования, которое крепится к силовой раме, а также с типами и формами креплений. В-четвертых, поскольку на рынке программных систем электронного геометрического моделирования и численного инженерного анализа имеется достаточно широкий выбор продуктов, необходимо определиться, какой из них является оптимальным для решения задач численного прочного анализа силовой рамы. Обобщающий блок задач (1–4), указанный на схеме, выполняется уже в виртуальной компьютерной среде одной либо нескольких выбранных программных систем.

Один из наиболее простых и понятных подходов для выполнения численного эксперимента – это выбор в пользу компьютерных систем полного жизненного цикла (PLM-системы), что позволяет проводить работы по электронному моделированию и численному анализу в рамках одной виртуальной среды, исключая вероятность возникновения проблем трансфера численных данных между программными продуктами различных производителей.

На настоящий момент существует множество публикаций по использованию современных методов численного прочного анализа как в отношении достаточно абстрактных стержневых трубчатых конструкций [1–15], к каковым можно отнести и силовую раму квадроцикла, так и к рамам и кузовным деталям конкретных транспортных средств [16–22]. В этих источниках рассматриваются численные эксперименты, отражающие отклик конструкции на нагрузку при варьировании различных характеристик: материала изготовления, пространственной конфигурации конструкций и прочее. Во многих работах в качестве средства вычислений используются расчетные модули специализированных инженерных программных PLM-систем.

В PLM-системах для проведения численного инженерного анализа используется в основном метод конечных элементов, когда электронная геометрическая модель исследуемой конструкции преобразуется в связанную сетку прямоугольных и треугольных элементов, обладающих определенными математическими и физическими характеристиками. Однажды созданная подобная конечно-элементная модель конструкции может использоваться для бесконечного числа численных экспериментов с различными нагрузками, условиями закрепления и методами расчетов, где, если рассматривать с общих позиций, используется известный математический инструментальный.

Общее уравнение движения механической системы в матричной форме имеет вид

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t), \quad (1)$$

где M – матрица масс; C – матрица коэффициентов демпфирования (сопротивлений); K – матрица коэффициентов жесткостей звеньев; \ddot{u} – вектор узловых ускорений; \dot{u} – вектор узловых скоростей; u – вектор узловых перемещений; $F(t)$ – вектор нагрузок; t – время.

В динамическом прочностном анализе происходит определение частотных характеристик исследуемой модели, что позволяет произвести качественную оценку прочностных свойств, определить вибрационную стойкость и наиболее слабые элементы конструкции.

Для определения собственных частот принимается допущение, что конструкция, подвергаясь анализу, совершает незатухающие колебания без воздействия внешних сил. Следовательно, $C = 0$ и $F(t) = 0$. В этом случае уравнение (1) имеет следующий вид:

$$M\ddot{u} + Ku = 0. \quad (2)$$

Поскольку уравнение линейное, а колебания для линейных систем носят гармонический характер, вектор перемещений можно записать в виде

$$u_i = u_0 \cos(\omega_i t), \quad (3)$$

где ω_i – собственная частота колебаний, u_i – перемещение i -го элемента, u_0 – начальное перемещение.

После подстановки выражения (3) в уравнение (2) получаем:

$$-Mu_i\omega_i^2 \cos\omega_i t + Ku_i \cos\omega_i t = 0.$$

Тогда при $t = 0$

$$(K - \omega_i^2 M)u_i = 0.$$

Из теории линейных алгебраических уравнений подобного вида известно, что нетривиальное решение существует тогда и только тогда, когда определитель, составленный из коэффициентов перед элементами вектора u_i (при $u_i \neq 0$), имеет нулевое значение, т. е.

$$\det(K - M\omega_i^2) = 0.$$

Это уравнение является исходным для поиска собственных частот колебаний исследуемой конечно-элементной модели. Решение этого уравнения является чисто математической задачей определения собственных значений, и алгоритм этого решения входит в стандартные процедуры PLM-систем.

Анализ напряжённо-деформируемой силовой рамы квадроцикла, находящегося в состоянии покоя, под воздействием массовых нагрузок со стороны навесных элементов и под воздействием силы тяжести является статической задачей. В статическом анализе вектора узловых скоростей \dot{u} и ускорений \ddot{u} являются нулевыми, поэтому инерционные и демпфирующие компоненты выпадают из рассмотрения и уравнение равновесия (1) приобретает вид

$$Ku = F(t).$$

Алгоритм решения этой задачи даже входит в стандартный расчетный модуль PLM-систем.

Результаты

В рамках работы над конструкцией квадроцикла было разработано следующее компоновочное решение (рис. 2).

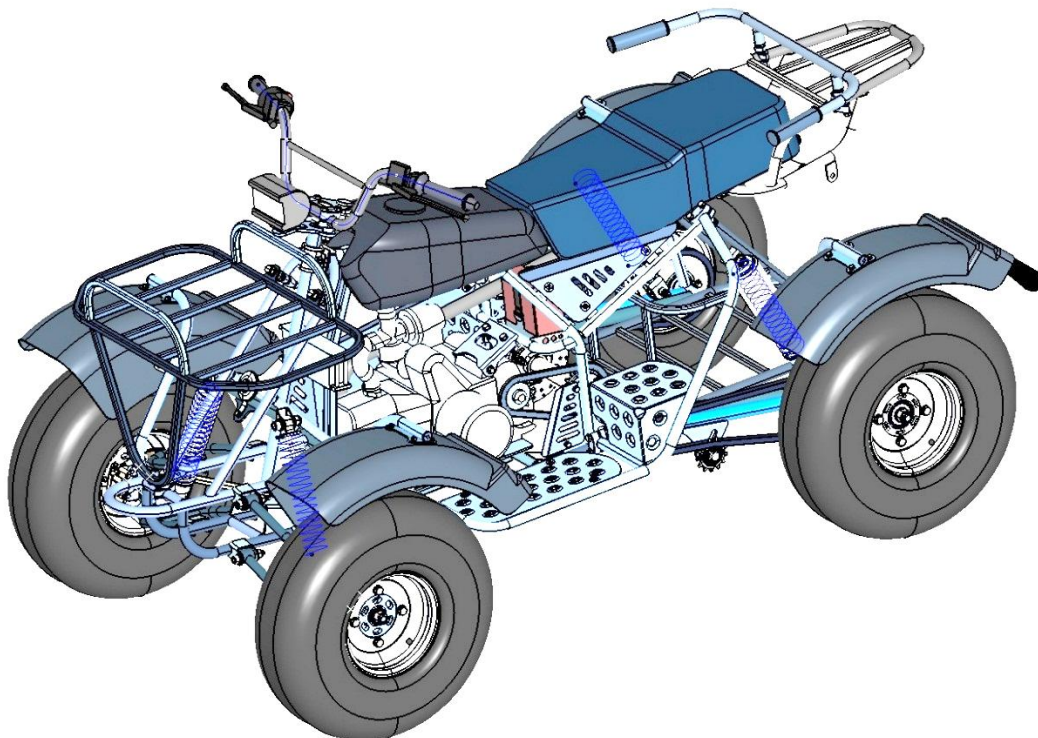


Рис. 2. Общий вид квадроцикла

Численные методы моделирования

Численный прочностной анализ силовых элементов конструкции является на сегодняшний день наиболее распространённой практикой при разработке различных типов ТС [1, 2] как в полном, так и упрощенном виде. Задачей виртуального прочностного анализа конструкции являлось выявление локализаций с пониженной прочностной устойчивостью, что должно было позволить определиться с дополнительными усиливающими элементами либо в форме отдельных деталей, либо в форме локального изменения геометрии трубчатой конструкции. Для проведения численного эксперимента полная электронная геометрия конструкции была существенно сокращена и модифицирована.

Двигатель, механизмы управления и передачи крутящего момента на колеса ТС, вес полезной нагрузки (водитель, пассажир, багаж) являются факторами, определяющими статическую рабочую нагрузку на силовой каркас. Поэтому для проведения расчетов при разработке электронной геометрической модели эти компоненты были исключены из расчетной схемы с последующим замещением на соответствующие точечные (по местам крепления узлов и механизмов) и распределенные нагрузки. На рис. 3 представлена силовая несущая рама квадроцикла.

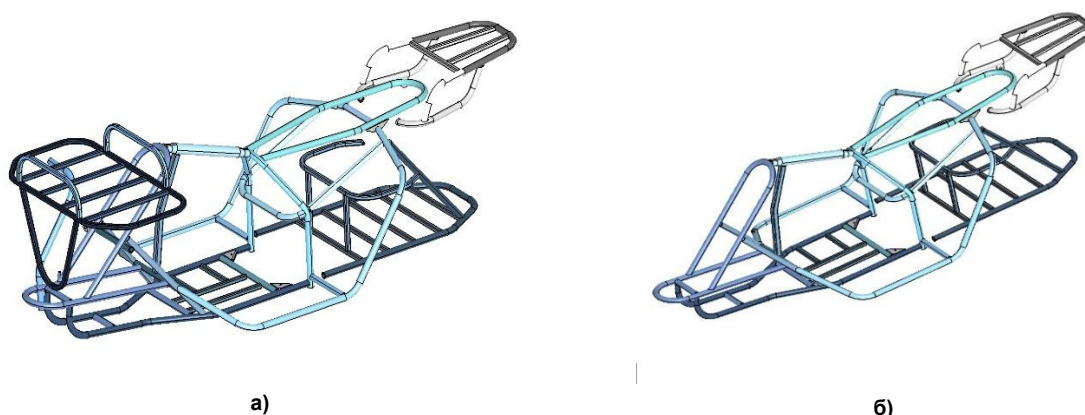


Рис. 3. Силовая несущая рама квадроцикла:
а – с багажным сегментом, б – без багажного сегмента

В дополнение к этому виртуальная модель силовой рамы была подвергнута модификации с целью замены узлов соединения деталей упрощенными соединительными геометрическими формами. Также с учетом симметричности конструкции в расчетную схему была включена только половина геометрии: вторая половина условно моделировалась соответствующими ограничениями симметричности перемещений (рис. 4). Результирующая конечно-элементная сетка в итоге составила 647648 узлов и 2500947 элементов.

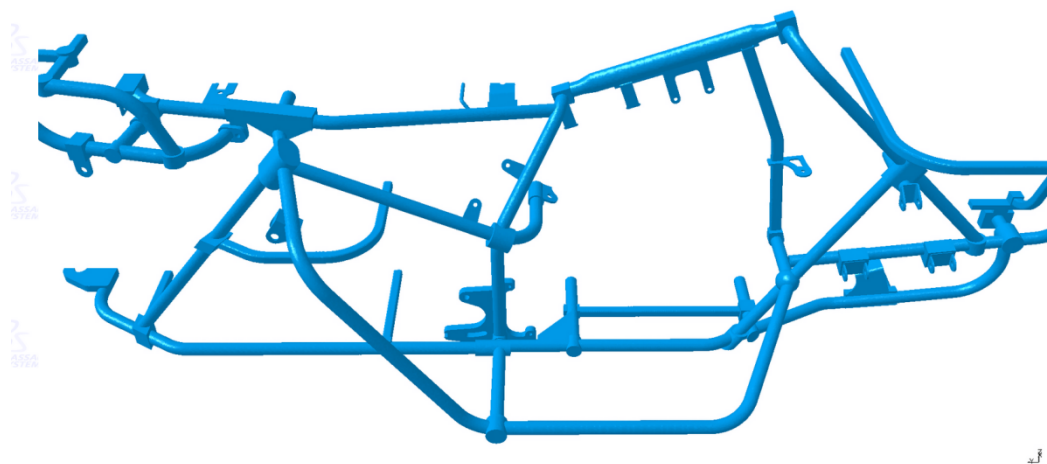


Рис. 4. Электронная модель силовой рамы для прочностного анализа

Для проведения расчетных процедур использовался материал (сталь) с характеристиками, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика материала расчетной модели

Параметр	Значение
Материал	сталь
Модуль Юнга	$2e^{11} \text{ N/m}^2$
Коэффициент Пуассона	0,266
Плотность	7860 кг/м^3
Предел прочности	$4,6 e^8 \text{ N/m}^2$

Таким образом, с учетом характеристик материала структурная масса модели (половина модели силовой рамы с учетом упрощения ее симметричности по осевой плоскости) составила 22,8 кг. Схема граничных условий и определения нагрузки конструкции силовой рамы представлена на рис. 5, где большими желтыми кругами отмечены массовые нагрузки на раму. Характеристики конечно-элементного разбиения расчетной модели представлены в табл. 2.

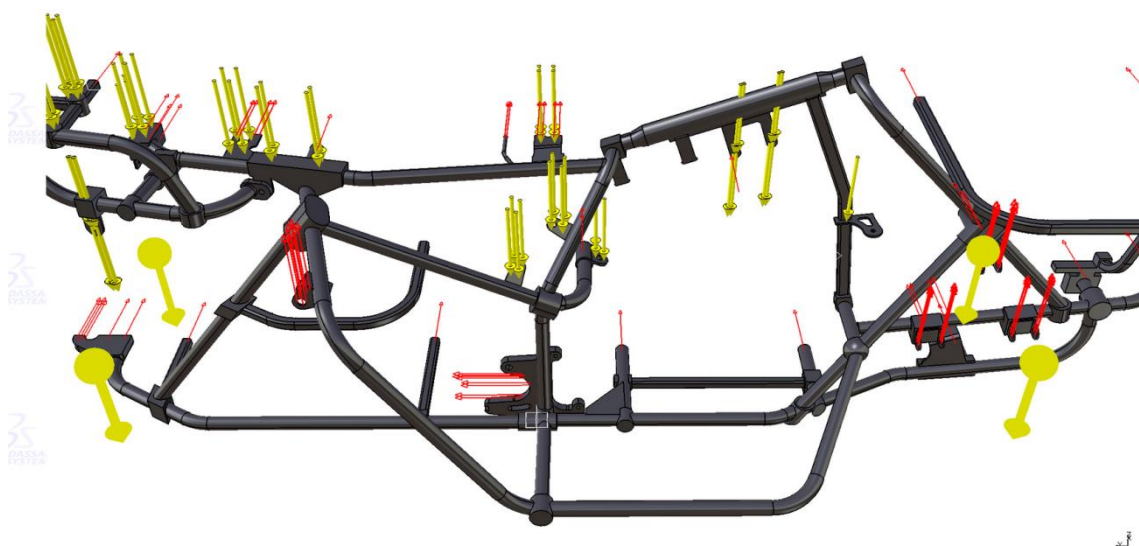


Рис. 5. Схема начальных и граничных условий при проведении статического прочного анализа

Таблица 2

Характеристики конечно-элементной модели

Параметр	Значение
Количество линий	1942944
Количество коэффициентов	36277671
Количество блоков	73
Максимальное количество коэффициентов на блок	500000
Общий размер матрицы	422,58 Мб

По результатам проведения численного прочностного анализа при статических нагрузках были получены следующие результаты по тензору полного напряжения (рис. 6).

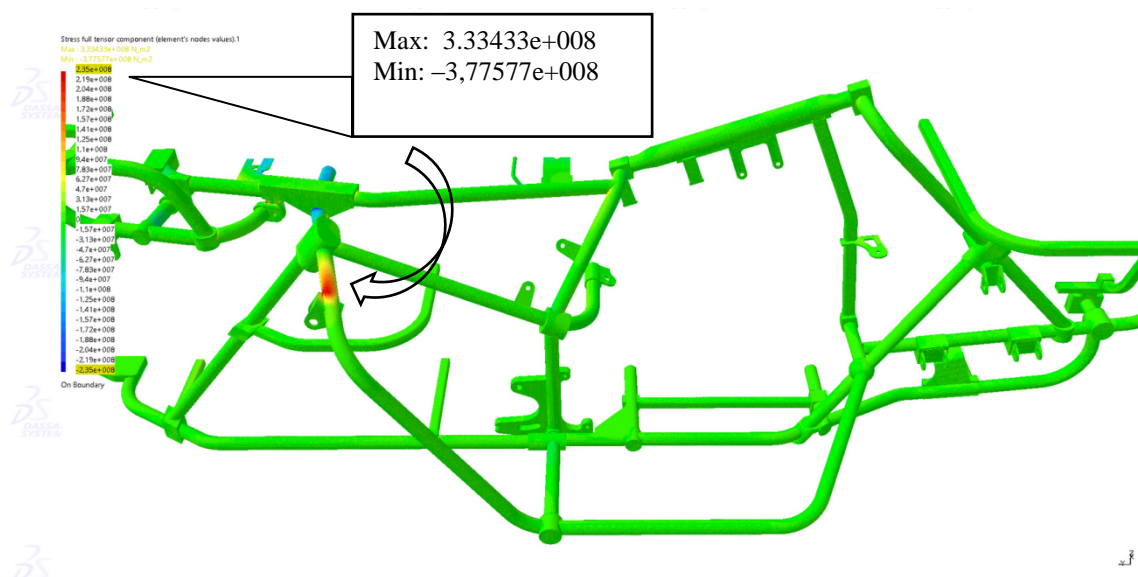


Рис. 6. Картина напряженно-деформируемого состояния трубчатого каркаса силовой рамы квадроцикла

Обсуждение

Как можно видеть из цветовой эпюры напряжений, в конструкции имеется область с пониженными прочностными характеристиками. Ее локализация в данном месте не является случайной. Рама квадроцикла конструктивно представляет собой обширный центральный осевой блок (как у рамы мотоциклов) с примыкающими к нему боковыми трубчатыми дугами, расширяющими силовую раму до габаритов квадроцикла. Расчеты выявили, что область с пониженными прочностными характеристиками располагается именно в области сопряжения «мотоциклетной» рамы и дополнительных дуг расширения. Для оптимизации конструкции было проведено несколько циклов прочностных экспериментов с варьированием толщины стенки трубчатой конструкции в этой области, а также формы ее крепления к «мотоциклетной» раме. В результате были получены следующие окончательные результаты оптимизации.

Локально возникающее максимальное напряжение растяжения в силовой раме – 333,4 МПа. Эта область отмечена красным. Здесь напряжение не превышает предела прочности для взятого материала (сталь), который составляет 460 МПа, что говорит о правильно выбранном компоновочном решении трубчатых составляющих каркаса конструкции.

В качестве выводов можно отметить, что данная выбранная схема трубчатого каркаса квадроцикла является в достаточной степени адаптивной по своим прочностным характеристикам для принятия в качестве основной в разрабатываемой модели ТС. Однако стоит заметить, что в некоторых локальных областях при статических нагрузках наблюдается незначительное превышения предела текучести, что потребовало введения дополнительных элементов усиления.

Литература

1. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Strain-Stress State Analysis of Bolted Connection of Thin-Walled Steel Profiles in Tension and Compression // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974. P. 672–675.
2. Паймушин В.Н., Иванов В.А., Луканкин С.А. Уточнённая геометрически нелинейная теория трёхслойных сферических оболочек с трансверсально-мягким наполнителем произвольной толщины // *Известия вузов «Авиационная техника»*. 2002. № 4. С. 11–16.
3. Паймушин В.Н., Иванов В.А., Луканкин С.А., Вялков А.Е. Задачи о напряженно-деформированном состоянии трехслойной цилиндрической оболочки с трансверсально-мягким наполнителем произвольной толщины при внешнем давлении и торцевом сжатии несущих слоев неодинаковыми усилиями // *Известия вузов «Авиационная техника»*. 2003. № 1. С. 8–13.
4. Паймушин В.Н., Иванов В.А., Луканкин С.А., Смешанные изгибные формы потери устойчивости трехслойной цилиндрической оболочки произвольной толщины при внешнем давлении и сжатии несущих слоев неодинаковыми усилиями // *Известия вузов «Авиационная техника»*. 2004. № 2. С. 14–21.

5. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A. Research in the flexural buckling modes of a cylindrical sandwich shell under the action of a temperature field inhomogeneous across its thickness // *Mechanics of Composite Materials*. 2004. № 40 (6). P. 461–472.
6. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A. Stress-strain state of a cylindrical sandwich shell in an axisymmetric temperature field inhomogeneous across the thickness // *Mechanics of Composite Materials*. 2004. № 40 (3). P. 323–340.
7. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A. Shear and flexural buckling modes of a spherical sandwich shell in a centrosymmetric temperature field inhomogeneous across the thickness // *Mechanics of Composite Materials*. 2004. № 40(4). P. 479–508.
8. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A., Vyalkov A.E. Shear buckling modes of cylindrical sandwich shells under external pressure, tension-compression of bearing layers with unequal forces, and inhomogeneous across-the-thickness temperature // *Mechanics of Composite Materials*. 2005. № 41(1). P. 23–32.
9. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Firsov V.A., Kholmogorov S.A. Exact analytical and numerical solutions of stability problems for a straight composite bar subjected to axial compression and torsion // *Mechanics of Composite Materials*. 2009. № 45(2). P. 113–136.
10. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Firsov V.A. Quality analysis of nonlinear elasticity theory for the stability problems of planar laminated curved beams. Problem statement // *Russian Aeronautics*. 2010. № 53(2). P. 167–172.
11. Paimushin V.N., Gunal I.Sh., Lukankin S.A., Firsov V.A. Quality analysis of nonlinear elasticity theory for the stability problems of planar laminated curved beams. Algorithm and results of numerical study // *Russian Aeronautics*. 2010. № 53(3). P. 264–270.
12. Paimushin V.N., Zakirov I.M., Lukankin S.A., Zakirov I.I. Computational-experimental method to determine the averaged elastic and strength characteristics of fillers of multilayered structures in shear // *Mechanics of Composite Materials*. 2012. № 48(4). P. 355–368.
13. Paimushin V.N., Zakirov I.M., Lukankin S.A., Zakirov I.I., Kholmogorov S.A. Average elastic and strength characteristics of a honeycomb core and a theoretical-experimental method of their determination // *Mechanics of Composite Materials*. 2012. № 48(5). P. 511–524.
14. Lukankin S.A., Paimushin V.N., Kholmogorov S.A. Non-classical forms of loss stability of cylindrical shells joined by a stiffening ring for certain forms of loading // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2014. № 78(4). P. 395–408.
15. Lukankin S.A., Paimushin V.N. Static and dynamic buckling modes of a cylindrical shell under external pressure. // *Mechanics of Solids*. 2014. № 49(1). P. 83–98.
16. Каюмов Р.А., Луканкин С.А., Паймушин В.Н., Холмогоров С.А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов. // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки*. 2015. Т. 157, кн. 4. С.112–132.
17. A unified machine for technological electric transport load-bearing system/ P. Božek, N.M. Filkin, S.N. Zikov,, A.I. Korshunov, P.M. Zavalov // *Acta Logistica – International Scientific Journal about Logistics*. 2017. Volume: 4. Issue: 2. P. 1–5.
18. Filkin N.M., Zykov S.N., Shaikhov R.F. A Practice of Applied Numerical Analysis During Design of a Unified Utility Electric-Transport Vehicle // *Proceedings – International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE October-2019, 9073206*. – P. 769–772.
19. Кудрявцев С.В. (ред.) Основы проектирования, производства и материалы кузова современного автомобиля: монография. Нижний Новгород: Нижегородский гос. технический ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2010. 233 с.
20. Автомобили: теория и конструкция автомобиля и двигателя: учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальностям «Техническое обслуживание и ремонт автомобильного транспорта», «Механизация сельского хозяйства» / В.К. Вахламов, М.Г. Шатров, А.А. Юрчевский; под ред. А.А. Юрчевского. М.: Академия, 2012. 810 с.
21. Основы конструкции автомобиля: учеб. для вузов / А.М. Иванов [и др.]. М.: За рулем, 2005. 335 с.
22. Гуляев В.А. Экспертная оценка технического состояния элементов кузова автомобиля на основе компьютерного моделирования // *Сборник научных трудов Sworld*. 2012. Т. 7. № 3. С. 75–79.

Далида Николай Вацлавович, АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг», г. Ижевск, amo@istu.ru

Зыков Сергей Николаевич, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск, zikov.sergei@yandex.ru

Филькин Николай Михайлович, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова», г. Ижевск, fnm@istu.ru

Поступила в редакцию 8 апреля 2023 г.

DOI: 10.14529/engin230207

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE NUMERICAL STRENGTH ANALYSIS OF THE POWER FRAME OF AN ATV

N. V. Dalida¹, amo@istu.ru

S. N. Zykov², zikov.sergei@yandex.ru

N. M. Filkin³, fnm@istu.ru

¹ Izhevsk Motor Plant "Axion-holding" JSC, Izhevsk, Russian Federation

² Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

³ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

The design of an ATV structure is a complex engineering task, where the development of a load-bearing frame is one of the priorities, which requires a systematic methodology. Purely analytical approaches to calculations, the results of which can be used in the development of a three-dimensional tubular frame structure, are now becoming a thing of the past, since the assumptions used in analytical methods give a significant calculation error, which makes it possible to obtain only a very approximate picture of the distribution of stresses and resulting deformations of the structure. It is also necessary to take into account that modern design technologies provide for the simultaneous use of various profiles of not only round, but also more complex sections, which should provide the necessary functionality of different sections of the frame (while providing a sufficiently large number of structural requirements for it), but significantly complicates the calculation procedures. With such input data, preliminary virtual electronic simulation of real products in combination with subsequent numerical engineering analysis is optimal and allows taking into account various design and technological nuances. Such software systems as CATIA related to PLM-systems (PLM – English product lifecycle management system) make it possible to perform both product modeling and, in fact, a series of numerical experiments within a single interactive environment. In the conditions of real design at the production facilities, such works are methodologically undeveloped and innovative. The purpose of the article is to consider approaches to optimizing the design of the power frame of an ATV using software computer engineering analysis tools and a previously created electronic geometric model of an ATV. In particular, the issues of preparing a model for subsequent finite element partitioning, evaluating the results of a numerical study in relation to evaluating the performance of the designed power frame of an ATV under the conditions of using the component base of previously developed power frames of motorcycles and buggies are touched upon.

Keywords: ATV, power frame, strength analysis, numerical experiment.

References

1. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Strain-Stress State Analysis of Bolted Connection of Thin-Walled Steel Profiles in Tension and Compression. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974, pp. 672–675.

2. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A. [Refined geometrically nonlinear theory of three-layer spherical shells with a transversely soft filler of arbitrary thickness]. *Izvestiya vuzov "Aviation technology"* 2002. No. 4, pp. 11–16. (in Russ.)

3. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Vyalkov A.E. [Problems of the stress-strain state of a three-layer cylindrical shell with a transversely soft filler of arbitrary thickness under external pres-

sure and end compression of the carrier layers by unequal forces]. *Izvestiya vuzov "Aviation technology"*. 2003. No. 1, pp. 8–13. (in Russ.)

4. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., [Mixed flexural forms of buckling of a three-layer cylindrical shell of arbitrary thickness under external pressure and compression of the carrier layers by unequal forces]. *Izvestiya vuzov "Aviation technology"*. 2004. No. 2, pp. 14–21. (in Russ.)

5. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A. Research in the flexural buckling modes of a cylindrical sandwich shell under the action of a temperature field inhomogeneous across its thickness. *Mechanics of Composite Materials*. 2004. № 40 (6), pp. 461–472.

6. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A. Stress-strain state of a cylindrical sandwich shell in an axisymmetric temperature field inhomogeneous across the thickness. *Mechanics of Composite Materials*. 2004. № 40 (3), pp. 323–340.

7. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A. Shear and flexural buckling modes of a spherical sandwich shell in a centrosymmetric temperature field inhomogeneous across the thickness. *Mechanics of Composite Materials*. 2004. № 40(4), pp. 479–508.

8. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Bushkov A.A., Vyalkov A.E. Shear buckling modes of cylindrical sandwich shells under external pressure, tension-compression of bearing layers with unequal forces, and inhomogeneous across-the-thickness temperature. *Mechanics of Composite Materials*. 2005. № 41(1), pp. 23–32.

9. Paimushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Firsov V.A., Kholmogorov S.A. Exact analytical and numerical solutions of stability problems for a straight composite bar subjected to axial compression and torsion. *Mechanics of Composite Materials*. 2009. № 45(2), pp. 113–136.

10. Pajmushin V.N., Ivanov V.A., Lukankin S.A., Firsov V.A. Quality analysis of nonlinear elasticity theory for the stability problems of planar laminated curved beams. Problem statement. *Russian Aeronautics*. 2010. № 53(2), pp. 167 – 172.

11. Pajmushin V.N., Gunal I.Sh., Lukankin S.A., Firsov V.A. Quality analysis of nonlinear elasticity theory for the stability problems of planar laminated curved beams. Algorithm and results of numerical study. *Russian Aeronautics*. 2010. № 53(3), pp. 264–270.

12. Paimushin V.N., Zakirov I.M., Lukankin S.A., Zakirov I.I. Computational-experimental method to determine the averaged elastic and strength characteristics of fillers of multilayered structures in shear. *Mechanics of Composite Materials*. 2012. № 48(4), pp. 355–368.

13. Paimushin V.N., Zakirov I.M., Lukankin S.A., Zakirov I.I., Kholmogorov S.A. Average elastic and strength characteristics of a honeycomb core and a theoretical-experimental method of their determination. *Mechanics of Composite Materials*. 2012. № 48(5), pp. 511–524.

14. Lukankin S.A., Paimushin V.N., Kholmogorov S.A. Non-classical forms of loss stability of cylindrical shells joined by a stiffening ring for certain forms of loading. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2014. № 78(4), pp. 395–408.

15. Lukankin S.A., Paimushin V.N. Static and dynamic buckling modes of a cylindrical shell under external pressure. *Mechanics of Solids*. 2014. № 49(1), pp. 83–98.

16. Kayumov R.A., Lukankin S.A., Paimushin V.N., Kholmogorov S.A. [Identification of the mechanical characteristics of fiber-reinforced composites]. *Scientific notes Kazan. university Ser. Phys.-Math. Sciences*. 2015. Vol.157, book. 4, pp. 112–132. (in Russ.)

17. Božek P., Filkin N.M., Zukov S.N., Korshunov A.I., Zavalov P.M. A unified machine for technological electric transport load-bearing system. *Acta Logistica – International Scientific Journal about Logistics*. 2017. Volume 4. Issue 2, pp. 1–5.

18. Filkin N.M., Zykov S.N., Shaikhov R.F. A Practice of Applied Numerical Analysis During Design of a Unified Utility Electric-Transport Vehicle. *Proceedings – International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE October 2019*. 9073206, pp. 769–772.

19. Kudryavtsev S.V. (ed.) *Osnovy proyektirovaniya, proizvodstva i materialy kuzova sovremennogo avtomobilya : monografiya* [Fundamentals of design, production and body materials of a modern car: monograph]. Nizhny Novgorod, 2010. 233 p.

20. Vakhlamov V.K., Shatrov M.G., Yurchevsky A.A.(ed.) *Avtomobili: teoriya i konstruktsiya avtomobilya i dvigatelya* [Cars: theory and design of a car and engine]. Moscow: Academy, 2012. 810 p.

Численные методы моделирования

21. Ivanov A. M. [and others]. *Osnovy konstruksii avtomobilya: ucheb. dlya vuzov* [Fundamentals of car design] Moscow: Behind the wheel, 2005. 335 p.

22. Gulyaev V.A. [Expert assessment of the technical condition of car body elements based on computer modeling]. *Collection of scientific papers Sworld*. 2012, Vol. 7, No. 3, pp. 75–79. (in Russ.)

Received 8 April 2023

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Далида, Н.В. Методические аспекты применения численного прочностного анализа силового каркаса квадроцикла / Н.В. Далида, С.Н. Зыков, Н.М. Филькин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 72–82. DOI: 10.14529/engin230207

FOR CITATION

Dalida N.V., Zikov S.N., Filkin N.M. Methodological aspects of the numerical strength analysis of the power frame of an ATV. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 72–82. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin230207