

УДК 678.5

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДИФИКАЦИЯ ОСНАСТКИ И ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ

© 2013 В.А. Комаров, Е.И. Куркин, А.С. Кузнецов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В статье предложена методика упрощенного конечно-элементного моделирования рам оснастки и формообразующей поверхности для изготовления деталей методом вакуумной инфузии. Проведено исследование примера такой оснастки. Даны рекомендации по модификации оснастки для увеличения ее крутильной жесткости. Рассмотрен вопрос выбора способа крепления формообразующей поверхности к раме и стрингерной оснастке.

Ключевые слова: композиционные материалы, вакуумная инфузия, оснастка, МКЭ-модель.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ужесточение требований к эффективности летательных аппаратов приводит к росту требований к материалам. Высокий уровень современной авиакосмической техники связан во многом с применением конструкционных, в том числе и полимерных композиционных материалов, которые обладают высокой надежностью, весовой эффективностью, хорошими технологическими и эксплуатационными свойствами [1-6]. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной техники описан, к примеру, в [7]. Отметим также, что в самолете Airbus A-380 центроплан, силовой набор крыла, хвостовое оперение, рули направления и высоты, задний гермошпангоут выполнены из углепластика, а общая массовая доля полимерных композиционных материалов составляет порядка 30% [8]. В Airbus A350XWB и Boeing 787 Dreamliner помимо вышперечисленных деталей из композиционных материалов изготовлены панели крыла, элементы фюзеляжа и другие особо ответственные конструкции, а доля применения композиционных материалов составляет более 50% [6, 9]. В России также идет внедрение деталей из композитов при проектировании МС-21, МТА и др [6].

Актуальной задачей является разработка технологий, позволяющих снизить стоимость изготовления композитных материалов, путем исключения необходимости использования автоклавного оборудования и изготовления препрега [1]. Альтернативой препрегово-анклавной технологии и технологии контактного формования являются «прямые» процессы (directprocess), совмещающие операции пропитки наполнителя связующим и формование детали, что приводит к сокращению времени производства и удешевлению технологии [1, 10].

К «прямым» процессом относят технологии пропитки под давлением (ResinTransferMolding – RTM), инфузионной пропитки под вакуумом (VacuumInfusion – VARTM), пропитки пленочным связующим (ResinFilmInfusion – RFI).

Главной альтернативной технологии контактного формования в настоящее время является технология вакуумной инфузии [1]. Точность воспроизведения теоретического контура композиционных панелей, изготавливаемых методом инфузии определяется формой поверхности рамы на которой осуществляется пропитка и выкладка. Основная проблема технологии вакуумной инфузии заключается в трудности получения детали со стабильными геометрическими и физико-механическими характеристиками [11].

Полимеризация смолы и, соответственно, закрепление формы происходит в термокамере при температуре 200°С. Форма поверхности в момент полимеризации определяется деформированным состоянием системы «панель – стрингерная оснастка – формообразующая поверхность – металлическая рама» под действием нагрузок от собственного веса и термических деформаций. Из-за существенной разности в ко-

Комаров Валерий Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов.

E-mail: vkomarov@ssau.ru

Куркин Евгений Игоревич, инженер кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов.

E-mail: eugene.kurkin@mail.ru

Кузнецов Антон Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: kuznetsov@ssau.ru

эффицентах линейного расширения материалов стрингерной оснастки, панелей, поверхности и рамы деформированное состояние системы является достаточно сложным.

Точность воспроизведения наружного контура в деформированном состоянии обеспечивается специальной системой стержневых креплений формообразующей поверхности к раме. Деформации формообразующей поверхности очень чувствительны к соотношению жёсткостей поверхности, рамы и соединительных стержней, а также к самому способу соединения поверхности к раме.

Данная работа направлена на исследование деформированного состояния рамы оснастки пропитки и выкладки, оценку чувствительности формы деформированного состояния к различным факторам и модификацию конструкции рамы с целью повышения точности воспроизведения теоретического контура в различных условиях эксплуатации.

2. МЕТОДИКА УПРОЩЕННОГО КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАМ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ И ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Твердотельное конечно элементное моделирование рам оснастки реальных конструкций

представляется необоснованно трудоемким, поскольку контролируемым результатом данных расчётов являются деформации рамы в виде перемещений. Можно выдвинуть гипотезу о возможности ее адекватного моделирования балочными элементами. С учетом выдвинутой гипотезы, на основе сопоставления результатов МКЭ-анализа с использованием твердотельных (рис. 1 а, б) и балочных элементов (рис. 1 в, г) для фрагментов, состоящих из типовых модулей рам оснастки с открытыми и закрытыми контурами, предложена методика перехода от твердотельной к балочной модели рамы.

Методика содержит решение двух основных вопросов. Нагружение открытого верхнего контура сопряжено с проблемой корректного моделирования связи балочных элементов, закрепление которых проводится в узлах и не учитывает связи элементов по ширине ребра, что приводит к требованию повышения изгибной жесткости элементов без изменения их жесткости на сжатие и растяжение, которое возможно удовлетворить изменением ширины сечения профиля без изменения его площади.

Вторым вопросом корректировки моделей на основе балочных элементов является вопрос уточнения расчетов при нагрузках под действием силы тяжести. Основным источником погрешно-

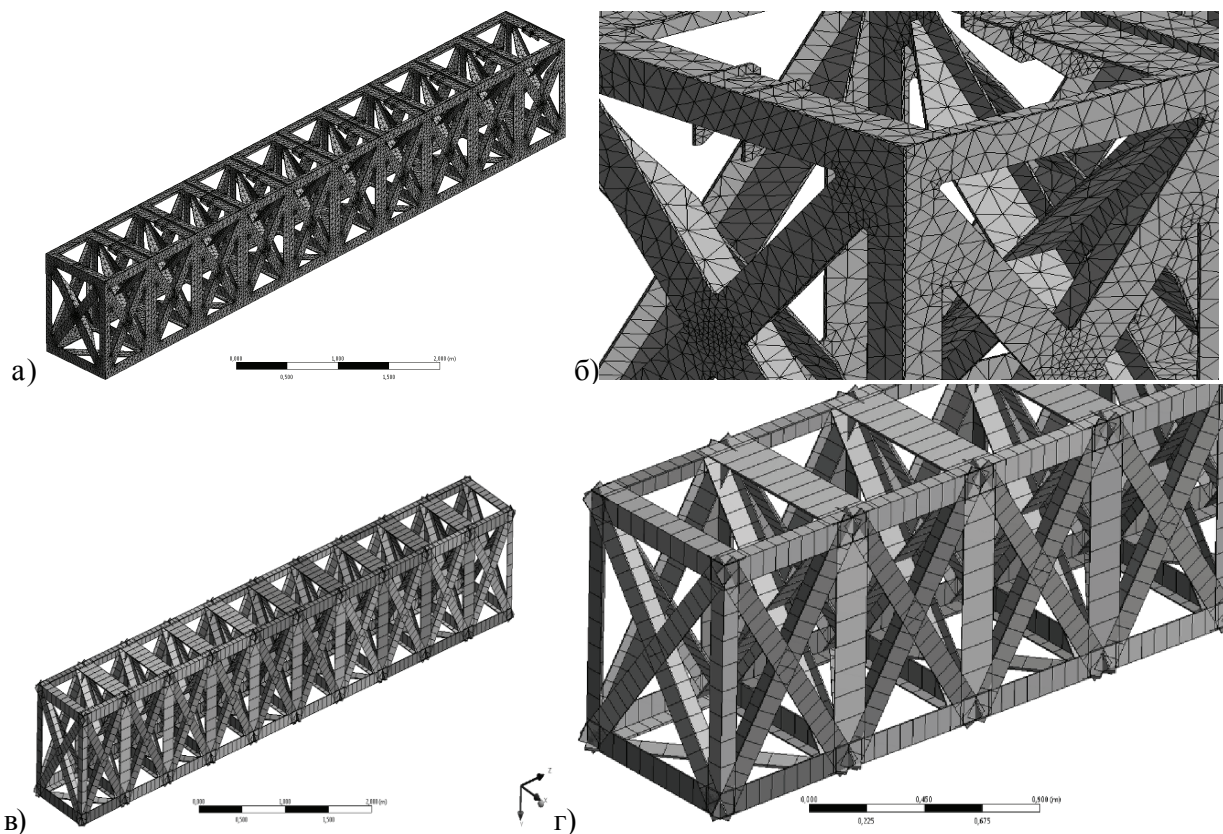


Рис. 1. Пример моделирования фрагментов из типовых модулей рам оснастки на основе а,б – твердотельных, в, г – балочных элементов

стей в этом случае является погрешность в вычислении массы модели, вызванная погрешностями описания формы модели балочными элементами, а именно – двойной учет массы профиля при наложении балочных элементов в узлах конструкции. Для сохранения площади сечений, корректно передающих нагрузки, и удовлетворения требования равства масс балочной и твердотельной моделей предложено проводить корректировку плотности материала.

Методика задания и корректировки жесткостей упрощенной модели и плотности материала позволяет обеспечить переход от твердотельной к балочной модели с погрешностью, не более 6% в перемещениях и позволяет использовать балочную модель для расчета деформированного состояния рамы.

С учетом так называемой квази-изотропной схемы укладки слоёв ткани композиционного материала его механические характеристики близки к изотропным. Для обоснования возможности перехода к изотропной модели и определения характеристик изотропного материала, решена тестовая задача по нагружению пластины размерами 1000 x 1000 мм и толщиной 8 мм одноосным растяжением равномерным потоком усилий и деформации при равномерном нагреве от 20 до 200°C. Модель составлена из оболочечных элементов (в системе ANSYS тип элемента SHELL181). В среде ANSYS Composite PrePost (ASP) заданы укладки слоёв композиционного материала. Получено, что из-за достаточно большой толщины пакета и, соответственно, большого количества слоёв, его механические характеристики близки к изотропным.

Моделирование поверхности в изотропной постановке избавляет от необходимости задания свойств каждого слоя, упрощает построение модели и сокращает время решения задачи. Поэтому в

дальнейших расчётах формообразующая поверхность моделируется в изотропной постановке.

3. ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАМЫ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ

Оценка выполнения требований ТЗ по жесткости на идеально ровном полу, а также исследование влияния возможных неровностей пола на НДС рамы проведено на основе МКЭ модели состоящей из балочных элементов, с учетом описанной ранее методики.

Конструкция рамы рассчитывалась на равномерно распределенную нагрузку 2 тонны, которая заменялась на сосредоточенные силы, приложенные в узлах верхней формообразующей поверхности рамы. Исследование рамы инфузионной оснастки показало, что рама имеет большую изгибную жесткость, удовлетворяя требованиям по прогибу центральной части. Запас изгибной жесткости позволил предложить способы облегчения конструкции рамы оснастки путем изменения толщин листов, из которых она была изготовлена, с учетом требования отсутствия потери устойчивости отдельных элементов оснастки.

Исследование поведения рамы в условиях несимметричной нагрузки, вызванной возможной неровностью пола и условиями транспортировки (случай «неровного пола»), когда одна из опор повисает в воздухе под действием силы тяжести и дополнительной нагрузки 2 тонны, показало большую величину прогиба незакрепленного угла (рис. 2), что является следствием недостаточной крутильной жесткости рамы.

Данное обстоятельство объясняется тем, что рассматриваемая модульная конструкция практически не имеет ни одного модуля с закрытым

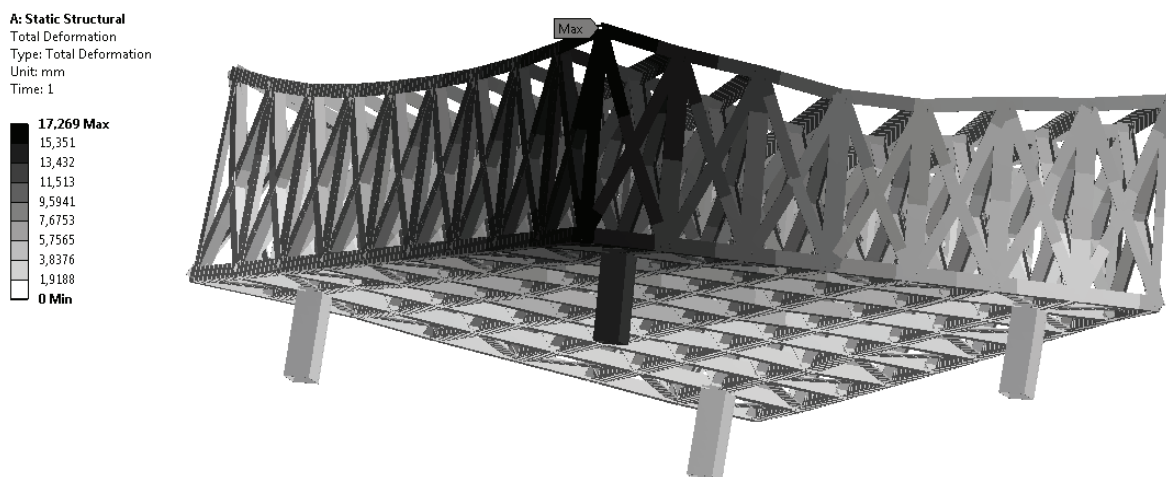


Рис. 2. Прогиб незакрепленного угла при расчете рамы на случай «неровного пола»

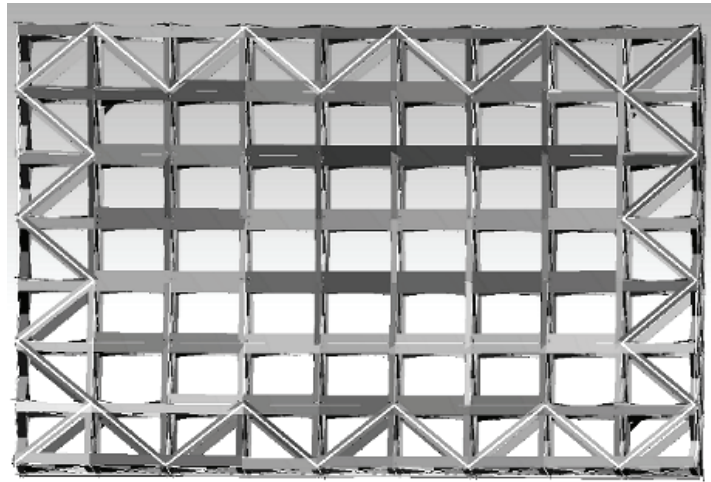


Рис. 3. Предпочтительный способ увеличения крутильной жесткости рамы – дополнение косых связей по периметру ее верхней поверхности

контуром, так как на верхней поверхности рамы нет ни одного косоугольного стержня. Предложен экономичный способ четырехкратного повышения крутильной жесткости рамы за счет постановки ряда косых стержней на верхней поверхности рамы. Рассмотрено четыре варианта расположения стержней. Максимальные величины деформаций свободного угла свидетельствуют о том, что наиболее удачный из рассмотренных вариантов – дополнение косых связей по периметру (рис. 3). В случае отсутствия технологической возможности реализации такого варианта возможны и другие способы усиления, в частности – дополнение косыми связями по углам или вдоль длины рамы.

4. ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМОУПРУГОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИИ РАМ С КОМПОЗИЦИОННОЙ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Отработана технология термоупругого анализа конструкции рам с композиционной формообразующей поверхностью в системе ANSYS Workbench. Геометрическая модель создана в программе ANSYS Design Modeler. В соответствии с разработанной методикой, стальная рама моделируется балочными элементами, формообразующая поверхность – оболочечными. Стрингерная оснастка, изготовленная из инвара моделируется балочными элементами. Жесткостные характеристики элементов, рассчитываются автоматически на основе формы поперечных сечений. Общее количество элементов в модели составляет около 28 500, узлов – 44 000. Кроме того, в модели присутствует достаточно большое количество вспомогательных элементов, моделирующих ограничения на взаимное положение отдельных узлов.

Для моделирования взаимодействия рамы с

полом, между поверхностями торцов опор и поверхностями пола создана контактная пара. Тип контакта – без разделения поверхностей и без трения (в терминологии ANSYS – no separation contact). В реальной конструкции стрингерная оснастка крепится к раме только по концам стрингеров. Между линиями стрингерной оснастки и формообразующей поверхностью создана контактная пара с возможностью разделения поверхностей и без трения в плоскости (frictionless contact). Все концы стрингерной оснастки по двум коротким сторонам рамы шарнирно закреплены к формообразующей поверхности (рис. 4 а). Рассмотрим более подробно способ моделирования соединения стержней, соединяющих раму с формообразующей поверхностью. В изученной модели присутствует два типа стержней – с жестким креплением к поверхности (рис. 4 б) и со скользящим креплением (рис. 4 в). В конечно-элементной модели стержень моделируется балочным элементом с установкой по двум концам шарниров (уравнений связи), определяющих способ взаимодействия с рамой и с формообразующей поверхностью. Уравнения связи построены в соответствии с типом конструкции стержней крепления – соединительные стержни со скользящим шарниром в верхней точке работают только на сжатие, а жестко закреплённые стержни – на растяжение и сжатие (рис. 4 б, в).

Наличие в модели контакта с возможностью разделения (стрингерная оснастка – формообразующая поверхность) и шарниров с ограничениями на перемещения узлов (работа только на сжатие скользящих стержней) требует выполнения нелинейного расчёта с приложением нагрузки последовательными шагами и корректировкой матрицы жесткости системы. В модели включён учёт геометрической нелинейности.

Для выбора шага приложения нагрузки

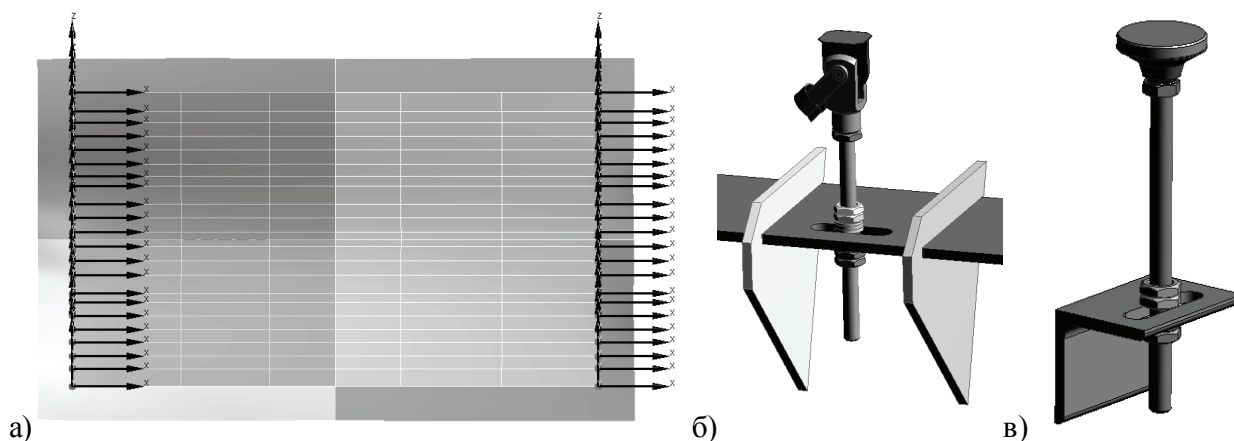


Рис. 4. Способ моделирования соединения стрингерной оснастки с формообразующей поверхностью (а),

типы конструкции стержней: б – с жёстким креплением к поверхности; в – со скользящим креплением

включена опция auto time stepping. Начальное количество шагов задано равным 10, минимальное – 1, максимальное – 100.

Отрыв оснастки от поверхности (рис. 5а) вызван тем, что коэффициент линейного расширения инвара в два раза меньше коэффициента линейного расширения углепластика.

Криволинейная поверхность при тепловом расширении натягивает стержни между узлами крепления. В реальной конструкции зазоры в контакте будут иметь меньшие значения из-за

наличия давления вакуумирования и некоторой податливости узлов крепления оснастки. Устранение стеснения стрингерной оснастки по направлению продольной оси, позволяет обеспечить более плотное её прилегание к формообразующей поверхности (рис. 5б) и является обязательным условием обеспечения прилегания стрингерной оснастки к изделию. Максимальные зазоры между изделием и оснасткой в таком случае составляют 1,8 мм и наблюдаются локально. На большей части поверхности зазоры лежат в

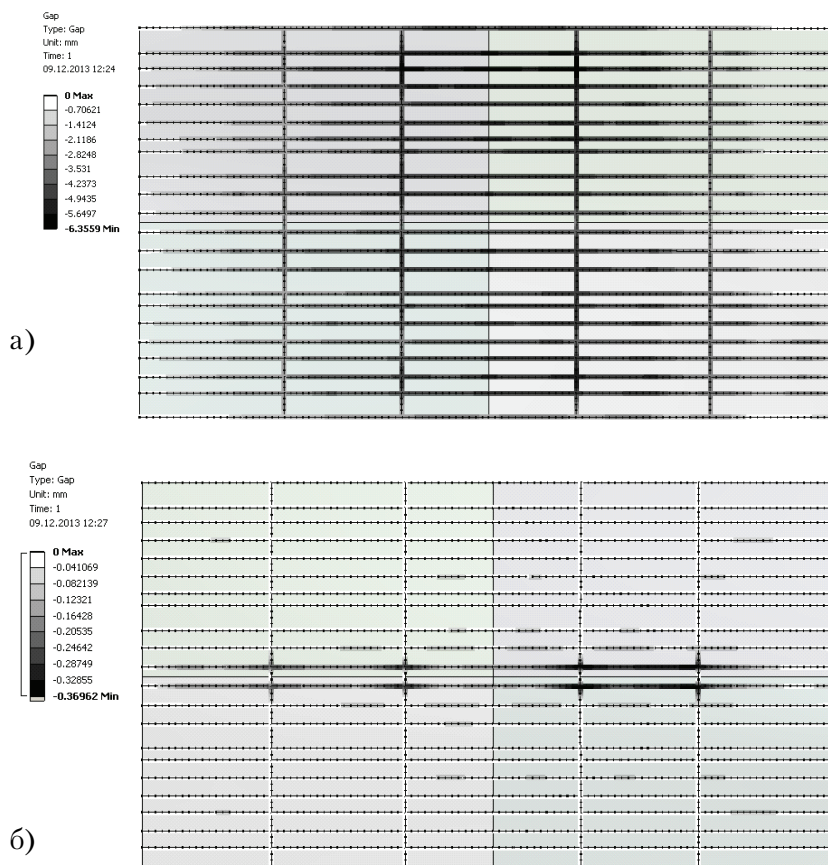


Рис. 5. Зазоры в контакте формообразующей поверхности и стрингерной оснастки: а – при стеснении стрингерной оснастки, б – без стеснения стрингерной оснастки

диапазоне от 0 до 0,5 мм. Конструктивно устранение стеснения в реальной конструкции оснастки может быть сделано обеспечением продольного зазора порядка 1,5 мм в месте крепления стрингерной оснастки к поверхности. Для последующих моделей рассматривалось соединение оснастки с поверхностью без стеснения.

Проведено комплексное исследование чувствительности формообразующей поверхности к способу ее соединения с рамой и стрингерной оснасткой. Исследовано влияние различных конструктивных факторов на деформации формообразующей поверхности в нагретом состоянии. Всего рассмотрено 7 вариантов модификаций конструкции.

Наибольшее влияние на вертикальные перемещения узлов формообразующей поверхности оказывает способ соединения поверхности с рамой. Малая крутильная жёсткость верхних стержней рамы вызывает высокую податливость опор стержней, соединяющих поверхность с рамой (рис. 6).

В случае жесткого закрепления соединительных стержней к раме и формообразующей поверхности они локально выкручивают поверхность в силу наличия моментного соединения (рис. 7а). Шарнирное крепление части стержней к раме и формообразующей поверхности позволяет существенно снизить вертикальные деформации поверхности и сделать их более равномерными (рис. 7б). При практической реализации конструкции следует стремиться к обеспечению наибольшей подвижности данных соединений. Обеспечение малого трения в шарнирном соединении стержней с рамой и поверхностью позволяет существенно сократить вертикальные перемещения узлов и повысить равномерность их распре-

деления по поверхности. Наличие или отсутствие скользящих стержней существенным образом не сказывается на результате. Толщина формообразующей поверхности в случае шарнирного опирания на раму также не оказывает существенно влияния на вертикальные перемещения.

ВЫВОДЫ

Разработана методика упрощенного конечно-элементного моделирования рам тонкостенной конструкции, состоящая в обоснованном использовании для моделирования рамы балочных элементов, что сокращает размерность решаемых задач на два порядка и трудоемкость в 5-6 раз. Вычислительными экспериментами показано, что предлагаемая упрощенная модель с использованием разработанной методики корректировки сечений балочных элементов обеспечивает погрешность вычисления перемещений рамы под нагрузкой не более 6%.

Проведено исследование поведения рамы в условиях несимметричной нагрузки, вызванной возможной неровностью пола и условиями транспортировки. Выявлена недостаточная крутильная жесткость рамы. Предложен экономный способ четырехкратного повышения крутильной жесткости рамы за счет постановки ряда косых стержней на верхней поверхности рамы.

Отработана технология термоупругого анализа конструкции рам с композиционной формообразующей поверхностью в системе ANSYS Workbench. Проведено комплексное исследование чувствительности формообразующей поверхности к способу ее соединения с рамой и стрингерной оснасткой. По результатам исследования выданы рекомендации по модернизации конст-

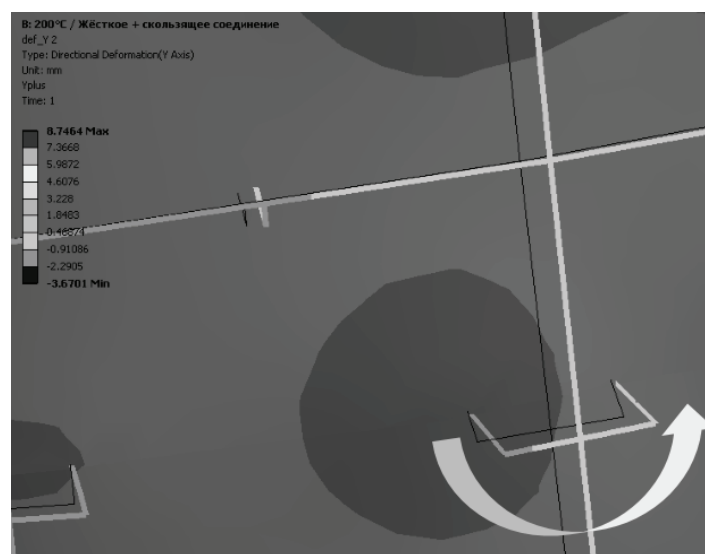


Рис. 6. Деформации верхней части рамы (тонкими линиями показано недеформированное состояние модели)

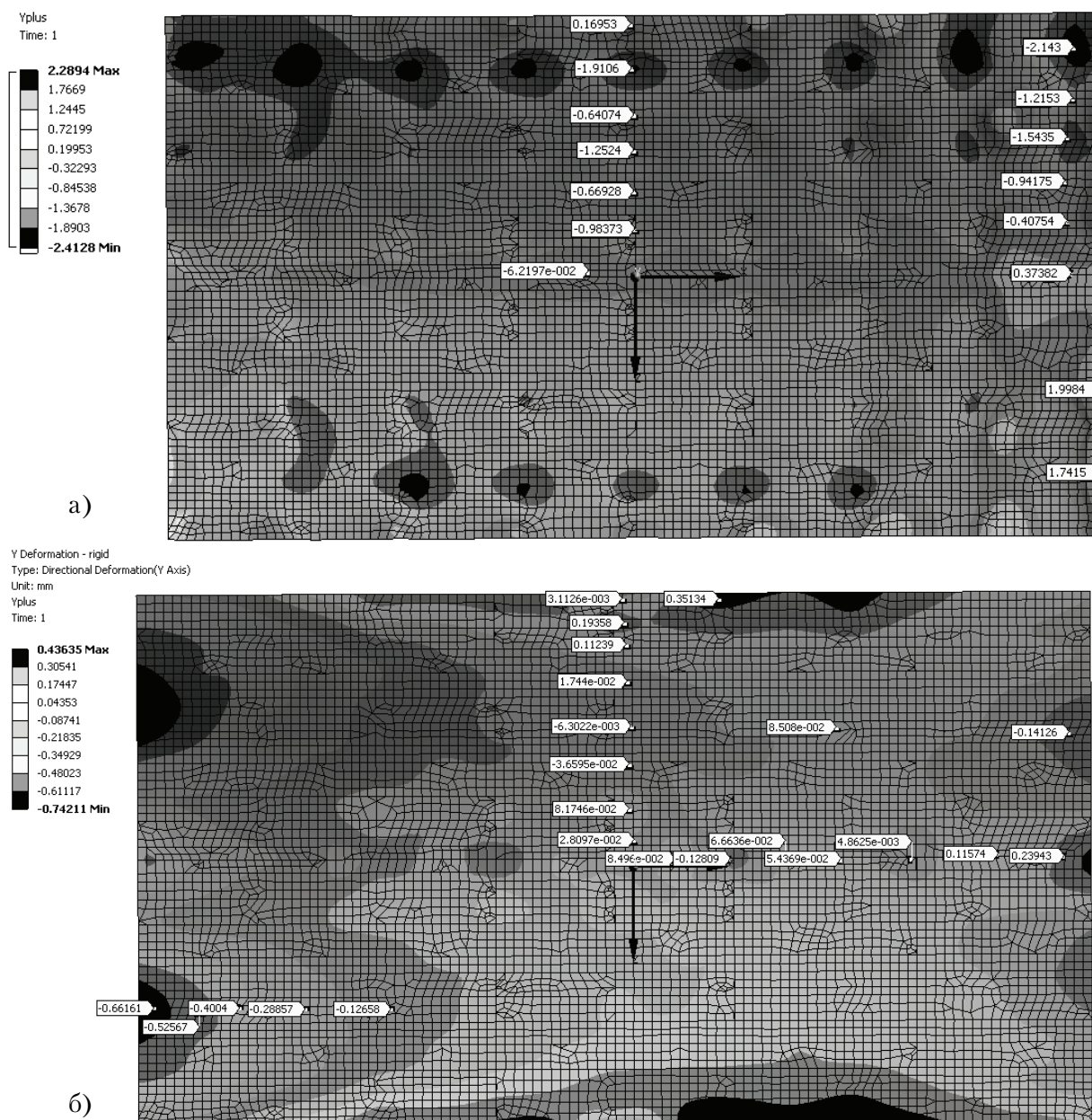


Рис. 7. Вертикальные перемещения формообразующей поверхности:

а – жёсткое соединение поверхности с рамой; б – шарнирное закрепление по всем стержням

рукции, которые уменьшают отслоение стрингерной оснастки от формообразующей поверхности с 6 мм до 0,3 мм и отклонения формообразующей поверхности от первоначальной формы при нагреве с 2,3 мм до 0,4 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нелюб В.А., Гращенков Д.В., Коган Д.И., Соколов И.А. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков // Химическая технология. 2012. Т.13. №12. С. 735 – 739.
2. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 1998.
3. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
4. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. М.: НОТ, 2008.
5. Лахтин Ю.М., Лонтьев В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение. 1990. 528 с.
6. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №4(3). С. 834 - 893.
7. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 4.
8. On The Wire: Resin Infusion Gains Speed in Aircraft Structures // Advanced Composite Keys Issue 6. Abaris training, 2005.
9. Bob Griffiths. Innovative use of international supplier base to revolutionize aircraft manufacture // High-

- Performance Composites. 2005.
10. Advanced Fibre-Reinforced Matrix Products for Direct Processes. Hexcel Corporation. Publication No. ITA 272a, 2007.
11. Karen Fisher Maden. Autoclave quality outside the autoclave? // High-Performance Composites, 2006. P. 132–136.

RESEARCH AND MODIFICATION OF EQUIPMENT AND FORMING SURFACES IN ORDER TO IMPROVE ACCURACY OF MANUFACTURING BY VACUUM INFUSION

© 2013 V.A. Komarov, E.I. Kurkin, A.S. Kuznetsov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article suggests a simplified method of finite element modeling of rigging frame and molding surface for the production of details by a vacuum infusion. An example of such equipment was studied. A recommendation on modifications to increase its torsional rigidity was given. The problem of selecting the method of fastening the molding surface to the frame and stringer snap was solved.

Keywords: composite materials, vacuum infusion, rigging, FEM model.

Valery Komarov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: vkomarov@ssau.ru

Evgeniy Kurkin, Engineer at the Aircraft Construction and Design Department. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru

Anton Kuznetsov, Candidate of Technics, Assistant Lecturer at the Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: kuznetsov@ssau.ru