

В.И. ГОЛОВЧЕНКО, Е.Н. БАРЧАН, М.М. ПЕКЛИЧ,

Головной специализированный конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь, ***А.Н. ТКАЧУК***, НТУ “ХПИ”

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Описано методи розрахунково-експериментального дослідження напружено-деформованого стану зварних конструкцій. Наведені результати розрахунку та експерименту для траверси підвісу козлового крана.

Methods of computational and experimental research of stress-strain state of welded structures are described. Results of calculations and experiments for frame crane traverse are given.

Введение. Расчеты прочности и натурные испытания являются составной частью процесса создания крупногабаритных конструкций. Высокая точность расчетов, обеспечиваемая с помощью современных конечно-элементных пакетов, позволяет объем испытаний свести к минимуму. Однако такая точность может быть достигнута только при условии использования адекватных методов расчетов и качественной конечно-элементной модели (КЭМ) конструкции.

В работах [1-6] предложены методы численного исследования напряженно-деформированного состояния крупногабаритных сварных конструкций и технология создания экспресс-систем для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем. Здесь рассматриваются вопросы качества КЭМ для выполнения расчетов статической прочности сварных металлических конструкций, состоящих из тонкостенных и массивных элементов.

Для получения качественной КЭМ необходим прежде всего правильный выбор типов конечных элементов, моделирующих элементы конструкции. Разумеется, что чем большим числом степеней свободы обладает конечный элемент, тем, обычно, выше точность результатов, получаемых при его использовании. Для расчетов простых конструкций практически всегда могут использоваться конечные элементы, имеющие для своего типа в пакете наибольшее число степеней свободы. Однако такой подход при расчете сложных конструкций может привести к невозможности решения задачи вследствие слишком большого количества степеней свободы ее КЭМ.

В данной статье рассмотрена и решена задача обоснования параметров конечно-элементных моделей пространственных сварных конструкций на примере траверсы крюковой подвески козлового крана грузоподъемностью 630 тс конструкции ОАО “ГСКТИ”, г. Мариуполь. Расчеты выполнялись с

помощью конечно-элементных программных комплексов COSMOSWorks 2006 и COSMOS/M 2.95.

1. Объект исследования. Объектом исследования является траверса крюковой подвески козлового крана грузоподъемностью 630 тс. Она служит для распределения нагрузки на канаты от веса поднимаемого груза. Траверса представляет собой стальную сварную балку коробчатого поперечного сечения переменной высоты. По обоим концам на верхнем поясе траверсы установлены проушины, на которых на осях монтируются подвижные блоки для каната. В среднем сечении траверсы в стенках имеется отверстие, усиленное накладкой и втулкой, через которое проходит ось, шарнирно соединяющая траверсу с крюковой подвеской крана.

Материал траверсы – конструкционная сталь 09Г2С. Модуль упругости и коэффициент Пуассона основного материала и материала сварных швов приняты равными $E=200$ ГПа, $\nu=0,3$.

2. Метод исследования. Для численного исследования напряженно-деформированного состояния траверсы был применен метод конечных элементов (МКЭ) [7], а для экспериментального – метод тензометрии [8].

В целом процесс исследования состоит из следующих основных этапов: создание геометрической модели, создание конечно-элементной модели, выполнение расчета, сравнение результатов расчета с данными эксперимента, принятие на основании сравнения решения о сохранении текущих значений параметров используемой КЭМ и выдаче результатов расчета или об изменении этих параметров и выполнении последующих расчетов.

Общая схема процесса проведения исследований приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчетно-экспериментальных исследований НДС конструкции

3. Геометрическая модель. Для построения геометрической модели траверсы за основу был взят чертеж 3219.10.07. Геометрическая модель построена в пакете SolidWorks-2006 (рис. 2). При ее построении мелкие детали, не влияющие на общее напряженно-деформированное состояние (НДС) траверсы, были опущены. Для задания нагрузки на траверсу в ее геометрическую модель был введен вал, соединяющий проушины и условно заменяющий ось, на которой устанавливаются канатные блоки.

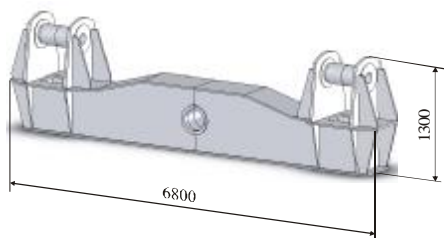


Рис. 2. Геометрическая модель траверсы

3. Расчетная схема. При расчете принято, что нагрузка на траверсу прикладывается через проушины, а закрепление траверсы происходит по ее поперечной плоскости симметрии. С учетом симметрии конструкции и нагрузки расчет выполнялся только для одной половины траверсы. Нагрузка от канатных блоков прикладывалась к валу в виде равномерно распределенной нагрузки (рис. 3).

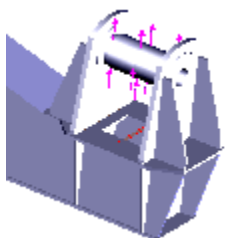


Рис. 3. Схема приложения нагрузки к валу



Рис.4. Грани деталей, относительно которых задается симметрия

Закрепление моделировалось запрещением в плоскости симметрии перемещений в направлении продольной оси траверсы всех точек и запрещением вертикальных перемещений точек нижней образующей внутренней поверхности втулки (рис. 4, 5).

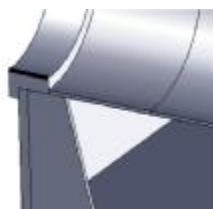


Рис. 5. Закрепление по кромке втулки

4. Конечно-элементная модель. *Выбор типа конечного элемента.*

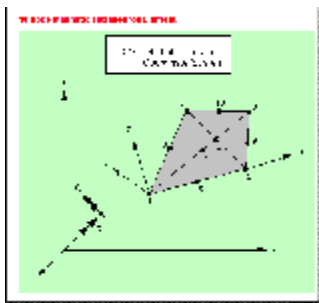


Рис. 6. Конечный элемент TETRA 10

Наличие в конструкции массивных и тонкостенных элементов требует использование пространственных конечных элементов. Для решения задач статики в пакетах COSMOSWorks 2006 и COSMOS/M 2.95 используется конечный элемент TETRA 10 (рис. 6), обеспечивающий достаточную точность описания НДС и аппроксимации геометрии модели, а также возможность генерации сетки в автоматизированном режиме (табл.1).

Таблица 1

Качество сетки	Размер КЭ, мм	Погрешность аппроксимации геометрии, мм	Кол-во КЭ	Кол-во узлов
Грубая сетка (рис. 7)	60	1.25	28767	56728
Сетка со сгущением (рис. 8)	50	1	49305	96562
Мелкая сетка (рис. 9)	25	1	180420	336145

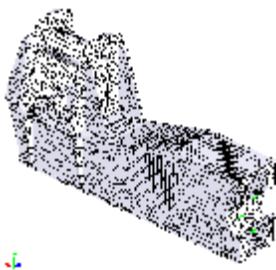


Рис. 7. Грубая сетка

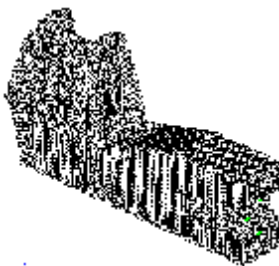


Рис. 8. Сетка со сгущением

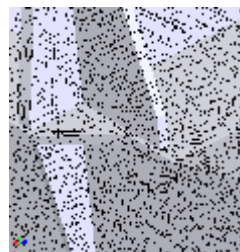


Рис. 9. Мелкая сетка

Выбор решателя. Выполнение расчетов по конечно-элементным моделям с большим количеством (более 100000) узлов требует больших затрат времени. Поэтому правильный выбор метода решения имеет большое значение. Существуют прямые и итерационные методы. На основе прямых методов, например, реализован решатель Sparse, на основе итерационных – FFEplus. В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа времени решения задачи с разным количеством узлов при применении этих решателей. Как следует из табл.2, использование решателя FFEplus даст существенную экономию времени выполнения расчета без существенной потери точности решения (отличие решений, полученных обоими методами, оказалось меньше заданной точности решателя FFEplus).

Определение необходимого количества слоев разбиения деталей конструкции по толщине. Для определения необходимого количества слоев конечно-элементной модели был проведен тестовый расчет консольной тонкостенной балки коробчатого поперечного сечения, нагруженной на свободном конце поперечной силой. Были построены конечно-элементные модели с одним, двумя и четырьмя слоями конечных элементов в толщине пластин. На рис. 10 показан фрагмент конечно-элементной модели рассчитываемой балки. Результаты расчетов в виде эпюр продольных напряжений приведены на рис. 11.

Таблица 2

Кол-во узлов	Время*, мин	
	Решатель FFEplus	Решатель Sparse
300000	2	13
500000	2,5	20
800000	5	44

*Расчеты проведены на компьютере с процессором Athlon 2000+, с объемом оперативной памяти 1.5 Гб

были построены конечно-элементные модели с одним, двумя и четырьмя слоями конечных элементов в толщине пластин. На рис. 10 показан фрагмент конечно-элементной модели рассчитываемой балки. Результаты расчетов в виде эпюр продольных напряжений приведены на рис. 11.

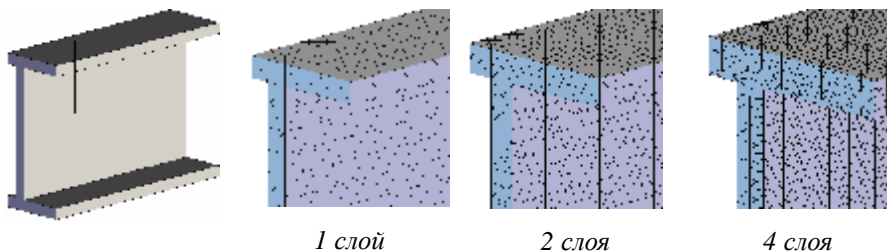


Рис. 10. Конечно-элементная модель коробчатой конструкции

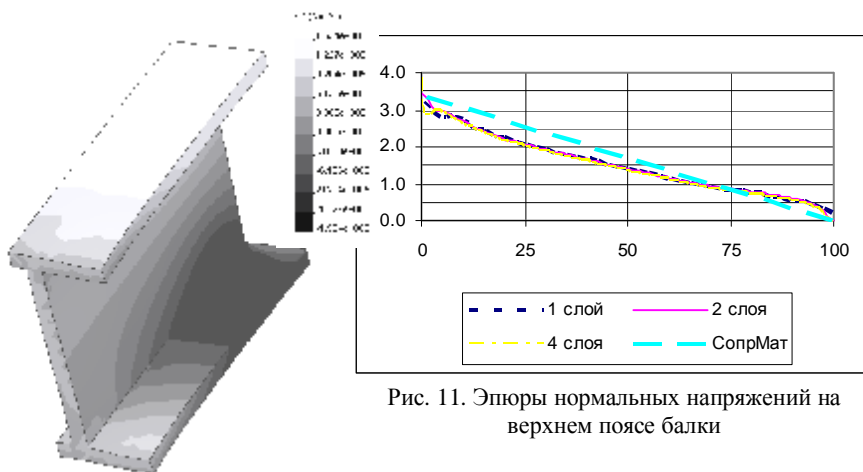


Рис. 11. Эпюры нормальных напряжений на верхнем поясе балки

Как видно, полученные результаты отличаются весьма незначительно, что подтверждает возможность использования для расчета подобных конструкций даже однослойных конечно-элементных сеток.

4. Результаты численного исследования НДС траверсы. Для проведения расчетов были выбраны комплексы COSMOSWorks 2006 и COSMOS/M 2.95. Последний по сравнению с CW 2006 имеет ряд преимуществ: большая база конечных элементов, более широкие возможности настройки решателя, экономия оперативной памяти. Достоинства CW 2006 – полная интеграция в SolidWorks-2006. Передача модели из SolidWorks-2006 в COSMOS/M 2.95 незначительно повышала скорость решения, однако результаты, полученные в обоих пакетах, практически полностью совпадали.

Было проведено три варианта расчета по моделям, отличающимся размерами конечных элементов (см. табл. 1). Эпюры нормальных напряжений и продольных деформаций по ширине верхнего и нижнего поясов траверсы при нагрузке 400 кН приведены на рис. 12-17 (по оси абсцисс отложено расстояние от середины пояса в направлении кромки в мм).

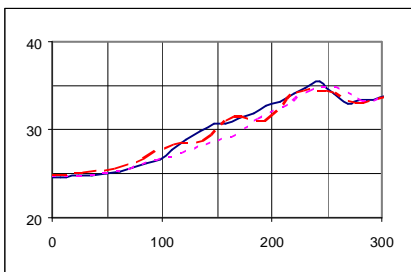


Рис. 12. Эпюры распределений нормальных напряжений по ширине нижнего пояса в среднем сечении траверсы, МПа

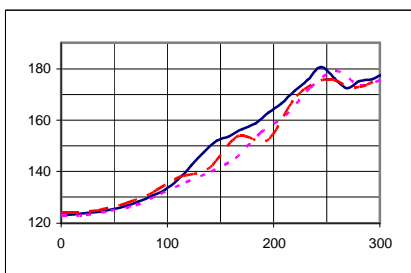


Рис. 13. Эпюры распределений продольных деформаций по ширине нижнего пояса в среднем сечении траверсы, мкм/м

Сравнение результатов расчетов показывает, что величины напряжений и деформаций от принятых в моделях размеров сетки существенно не зависят, т.е. существенного улучшения результатов при использовании мелкой конечно-элементной сетки не наблюдается. Из этого следует, что удовлетворительные результаты можно получать на конечно-элементных

моделях со средними размерами конечных элементов (порядка 2-3 толщин элемента конструкции).

Рис. 14. Эпюры распределений нормальных напряжений по ширине верхнего пояса в среднем сечении траверсы, МПа

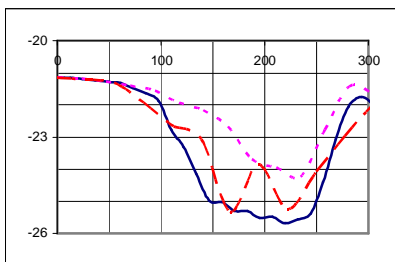


Рис. 15. Эпюры распределений продольных деформаций по ширине верхнего пояса в среднем сечении траверсы, мкм/м

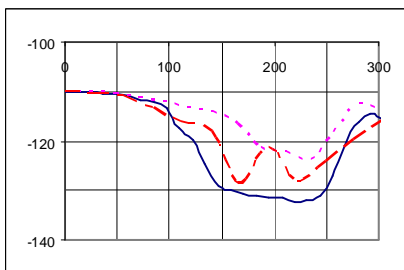


Рис. 16. Эпюры распределений нормальных напряжений по ширине нижнего пояса в сечении установки тензодатчиков №302, №303, МПа

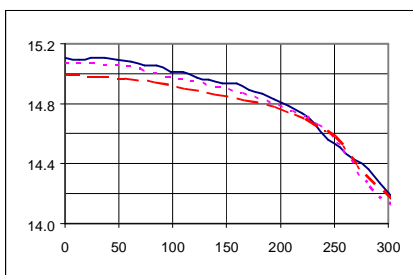
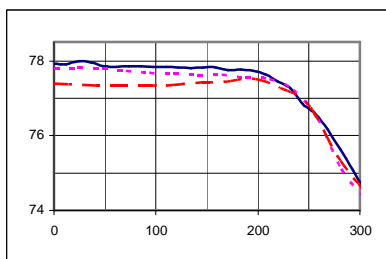


Рис. 17. Эпюры распределений продольных деформаций по ширине верхнего пояса в сечении установки тензодатчиков №302, №303, мкм/м



6. Результаты экспериментального исследования. Схема установки тензодатчиков на поясах траверсы приведена на рис. 18. Величины

напряжений, полученных при испытаниях, приведены в табл. 4.

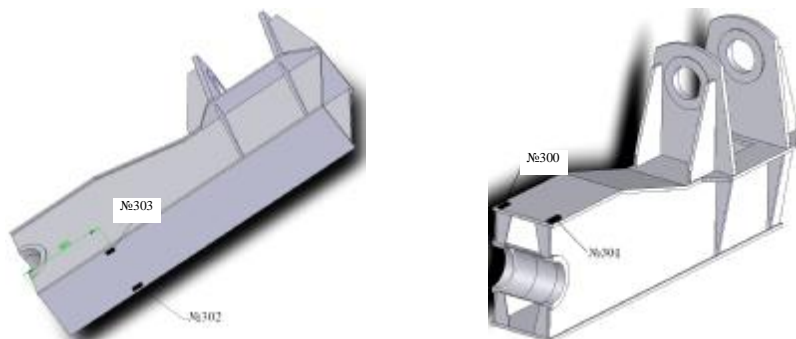


Рис. 18. Схема размещения тензодатчиков на поясах траверсы

Таблица 4

Продольные напряжения, МПа

Нагрузка на траверсу, МН	№ тензодатчика			
	302	303	300	301
3,95	127	124	-187	-187
3,15	101,5	99	-149,5	-149,5
	100	98,5	-150,5	-149,5
	101,5	99	-150,5	-150,5

7. Сравнение результатов численного и экспериментального исследований. В табл. 5 приведены величины напряжений, полученные экспериментально и в результате расчетов.

Таблица 5

№ датчика	Напряжения при нагрузке 3,15 МН			Напряжения при нагрузке 3,95 МН		
	эксперимент, МПа	Расчет, МПа	Относительная разность результатов, %	эксперимент, МПа	Расчет, МПа	Относительная разность результатов, %
300	-150.0	-162.0	7,78	-187.0	-203.0	8,41
301	-150.0	-160.0	6,78	-187.0	-201.0	7,41
302	101.0	107.0	6,37	127.0	135.0	6,07
303	99.0	107.0	7,61	124.0	134.0	7,73

Как видно из табл. 5, получено хорошее соответствие результатов расчетов и эксперимента.

Заключение. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния траверсы козлового крана позволяет заключить следующее.

1. При исследовании напряженно-деформированного состояния пространственных сварных конструкций, аналогичных исследованным, допустимо использование одно-, двуслойных конечно-элементных моделей на основе пространственных конечных элементов, однако используемые КЭ должны содержать на сторонах (ребрах) промежуточные узлы и иметь хотя бы вторые степени интерполяционных координатных функций.

2. При большой размерности конечно-элементной модели (более 100000 узлов) выигрыш во времени выполнения расчета достигается использованием итерационных решателей (FFEplus).

3. Созданная на основе дополнительных специальных расчетно-экспериментальных исследований конечно-элементная модель траверсы обеспечила достаточно высокую точность определения напряженно-деформированного состояния (отличие результатов расчета от экспериментальных данных не превысило 9%).

4. Обнаруженный в исследованиях эффект превышения расчетных напряжений над экспериментальными может быть обусловлен тем, что применяемые тензодатчики имеют базу 10 мм, а точки “измерений” на КЭМ попадают в зону больших напряжений (в пределах базы тензодатчиков).

Примененная методика создания конечно-элементной модели и выполнения расчета может быть использована при исследовании НДС металлоконструкций с аналогичной геометрией при аналогичном характере напряженно-деформированного состояния.

Список литературы. 1. *Ткачук Н.А., Орлов Е.А., Головченко, В.И. Гоголь Н.А.* Экспресс – модели и экспресс – системы для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 53. – С.116-138. 2. *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение параметров конечно-элементных моделей // Механіка та машинобудування. – 1998. – № 1. – С.68-75. 3. *Канустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып.53.– С.148-155. 4. *Ткачук Н.А.* Комбинированные расчетно-экспериментальные методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем // Механіка та машинобудування. – 1999. – № 1.– С.37-46. 5. *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение характера граничных условий в сложных механических системах // Механіка та машинобудування. – 2000. – № 1. – С.28-34. 6. *Ткачук Н.А.* Элементы технологических систем: компьютерные модели, экспериментальные исследования, численный анализ прочности и жесткости // Вісник Інженерної Академії України. – Київ.– 2001.– № 3 (част.2). – С.297-302. 7. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 8. *Касатки Б.С., Кудрин А.С., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев Н.А.* Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. – Киев: Наукова думка, 1981. – 583 с.