

УДК 629.7.085

Применение многослойных конечноэлементных моделей для определения напряженного состояния элементов несущих конструкций агрегатов стартовых комплексов

Зверев В. А.^{1,*}, Ломакин В. В.¹

^{*}zverev_vadim@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена определению рациональных параметров многослойных конечноэлементных моделей, предназначенных для расчета напряженно-деформированного состояния элементов характерных узлов агрегатов стартовых комплексов различного назначения. В работе приведены конструктивная схема узла крепления гидро- или пневмоцилиндра, блока и т.д., а так же конечноэлементные модели несущего диска узла крепления. Модели содержат различное количество слоев конечных элементов по толщине диска. На основе результатов расчета напряжений в моделях, проведенных в программном комплексе MSC Nastran, был сделан вывод о рациональном количестве слоев в модели диска и характере распределения напряжений по его толщине. Учет рекомендаций, приведенных в статье, позволит более корректно делать заключение о работоспособности элемента конструкции особенно в случае возникновения в нем напряжений близких к допускаемым.

Ключевые слова: сетка, метод конечных элементов, несущая конструкция, слой, напряженное состояние

Введение

Одним из типовых элементов конструкции различных агрегатов стартовых комплексов является узел крепления гидро- или пневмоцилиндра, блока и т.д. (рис. 1).

Особенностью данной конструкции является наличие диска, передающего момент от развитой консольной оси к ее внешней обойме (рис. 2). Зачастую именно этот диск является наиболее нагруженным элементом узла, требующим расчета его местной прочности.

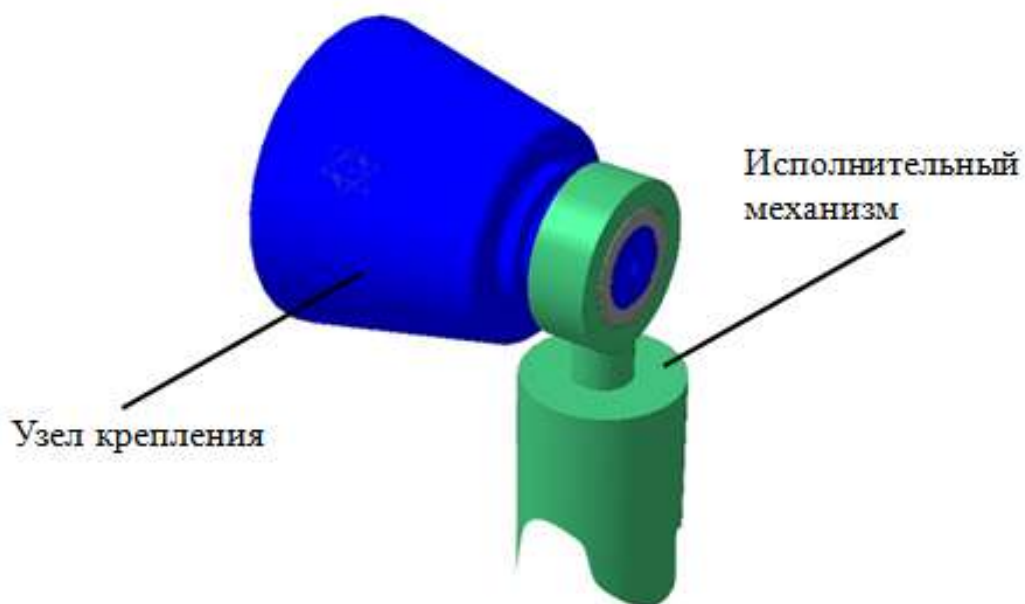


Рис.1. Конструктивная схема узла крепления с исполнительным механизмом

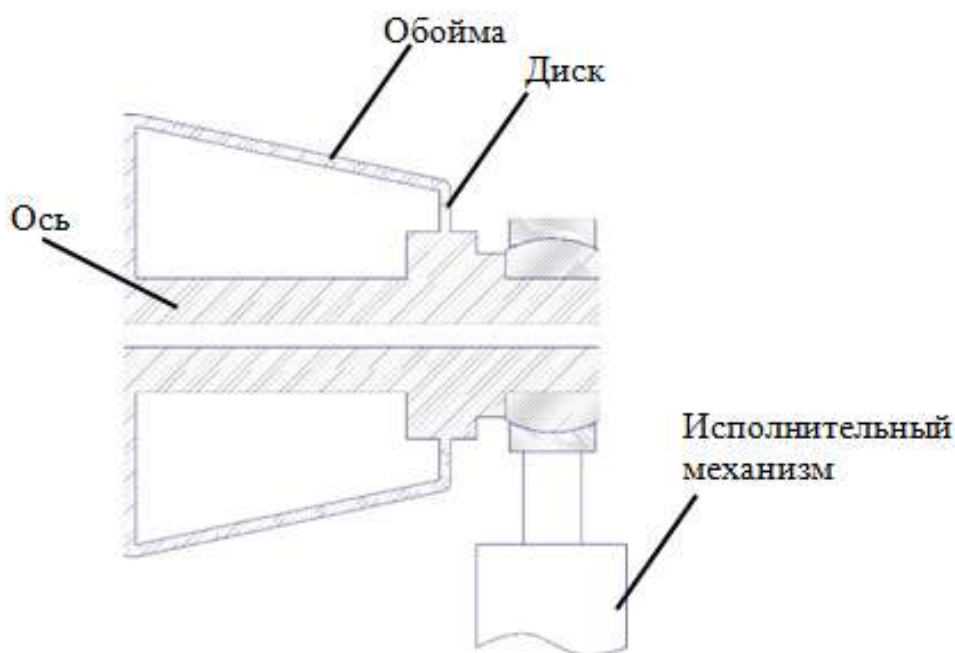


Рис.2. Элементы узла крепления

Нетрудно заметить, что работа диска похожа на типовую задачу об изгибе круглой пластины под действием момента, если считать центральную часть диска очень жёсткой. Если толщина диска по отношению к его радиусу небольшая, то расчет напряжений в диске можно проводить по известной методике расчета изгиба защемленной по краю круглой пластины с жестким центральным диском с приложенным к нему моментом (рис.3) [1].

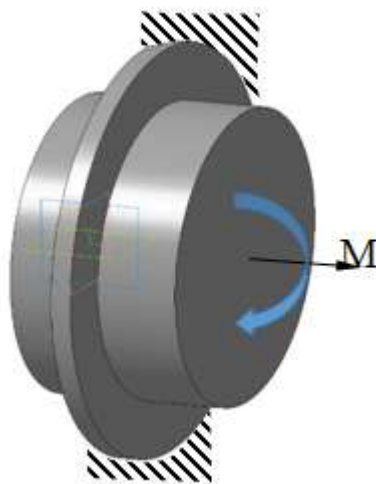


Рис.3. Расчетная схема заземленной по краю круглой пластины с жестким центральным диском с приложенным к нему изгибающим моментом

Эта методика позволяет рассчитать уровень напряжений в изгибаемом диске лишь при типовых закреплениях: заделке или шарнирном опирании внешнего контура. В случае же, если имеет место конструкция, приведённая на рис. 1, и закрепление осуществляется в другом месте конструкции, то применение этой методики затруднено. Так же затруднено получение аналитических зависимостей для расчета распределения напряжений по толщине диска, что часто является необходимой для оценки его местной прочности.

В данном случае для определения напряжённо-деформированного состояния (НДС) диска рационально применение метода конечных элементов [2]. С целью получения распределение напряжения по толщине диска удобно использовать его многослойные конечноэлементные модели. При этом встает вопрос о необходимом количестве слоев для адекватного описания распределения напряжений по толщине диска. Целью данной статьи является обоснование выбора параметров многослойной модели на примере расчета НДС диска узла крепления.

Моделирование и расчет

При помощи программного комплекса (ПК) MSC Nastran [3] были созданы пять конечноэлементных моделей диска с одинаковыми геометрическими параметрами (диаметр диска - 250 мм, диаметр жесткой центральной части диска – 180 мм, толщина диска – 10 мм), тестовым нагружением и закреплением. Модели отличаются лишь количеством слоев конечных элементов по толщине диска.

Модель №1 представлена на рис.4. В силу симметрии модель представляет лишь половину диска. Внешние связи накладываются на торец половины диска. В качестве конечных элементов использованы элементы типа HEX8 (восьмиузловой гексагональный элемент), для моделирования жесткой центральной части диска использованы элементами RBE2 (жесткая связь).

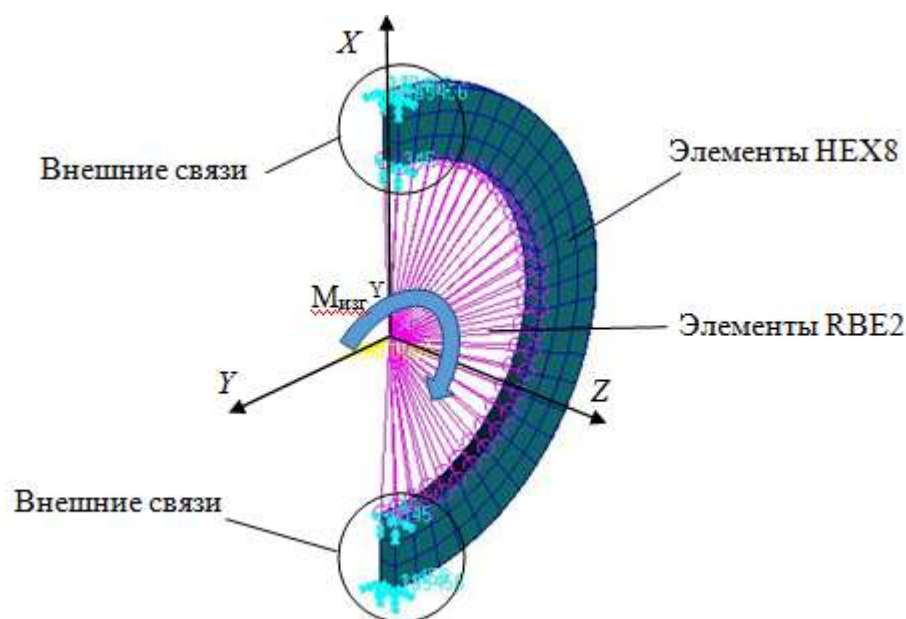


Рис.4. Модель №1. Расчетная схема для определения напряженного состояния

Особенностью модели является один слой конечных элементов по толщине диска. В качестве тестового нагружения прикладывается изгибающий момент вокруг оси Y ($M_{изг}^Y$) равный 1000 Н·м.

С помощью ПК MSC Nastran было определено НДС модели диска. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в модели №1 показано на рис.5...6.

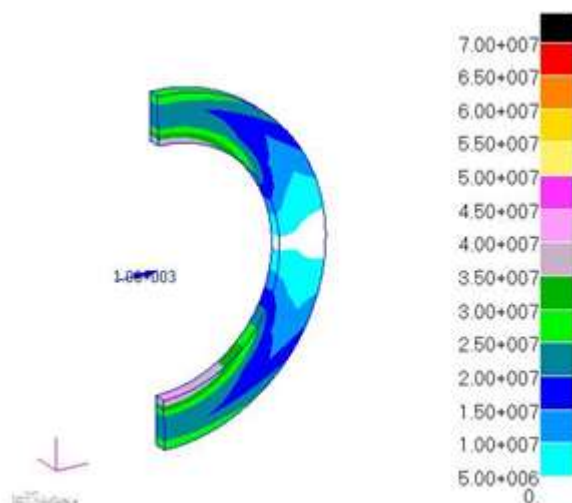


Рис.5. Модель №1. Общая картина распределения напряжений

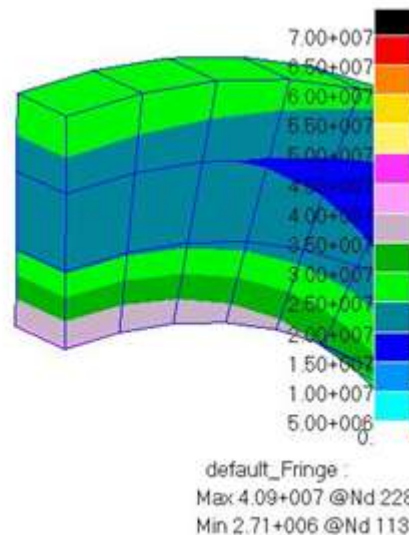


Рис.6. Фрагмент модели №1. Распределение напряжений по толщине диска

Модель диска №2 отличается от модели, представленной на рис. 4, лишь количеством слоев конечных элементов по толщине диска (3 слоя). Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в модели №2 показано на рис. 7...8.

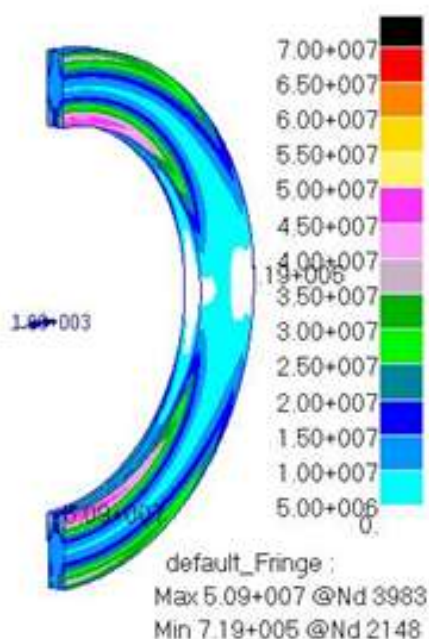


Рис.7. Модель №2. Общая картина
распределение напряжений

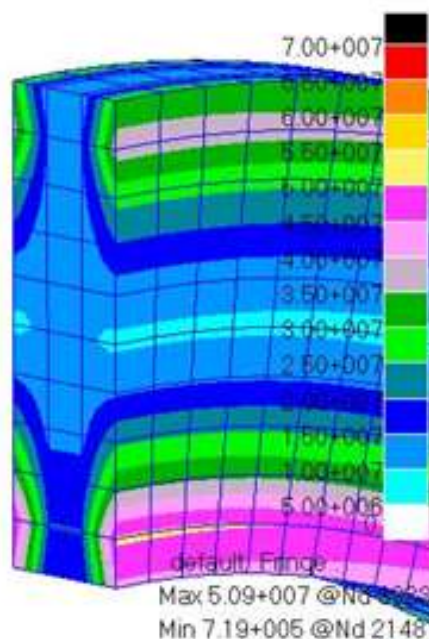


Рис.8. Фрагмент модели №2.
Распределение напряжений по толщине диска

Модель диска №3 отличается от модели, представленной на рис. 4, лишь количеством слоев конечных элементов по толщине диска (5 слоев). Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в модели №3 показано на рис. 9...10.

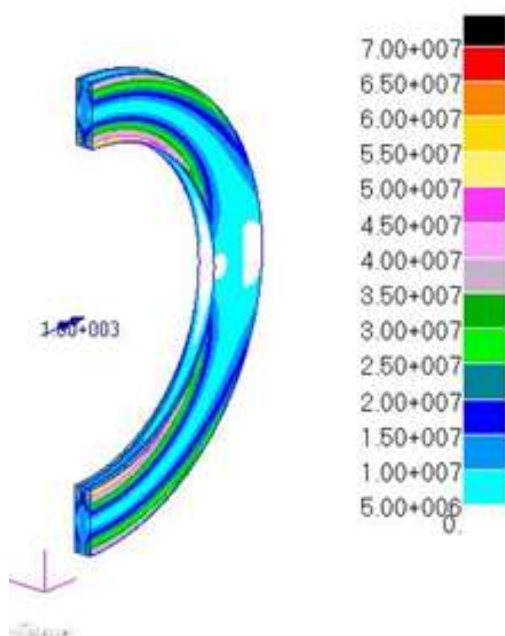


Рис.9. Модель №3. Общая картина
распределение напряжений

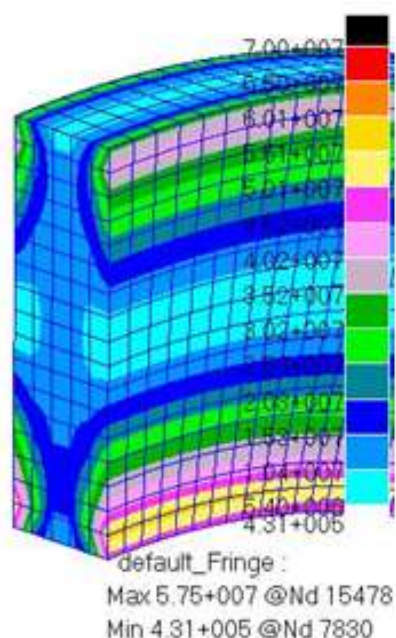


Рис.10. Фрагмент модели №3.
Распределение напряжений по толщине диска

Модель диска №4 отличается от модели, представленной на рис. 4, лишь количеством слоев конечных элементов по толщине диска (8 слоев). Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в модели №4 показано на рис. 11...12.

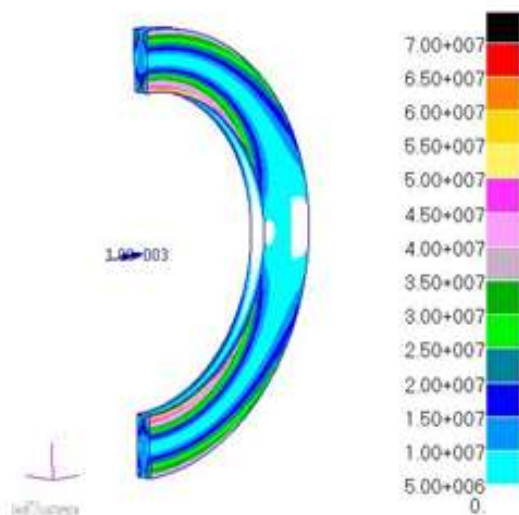


Рис.11. Модель №4. Общая картина распределение напряжений

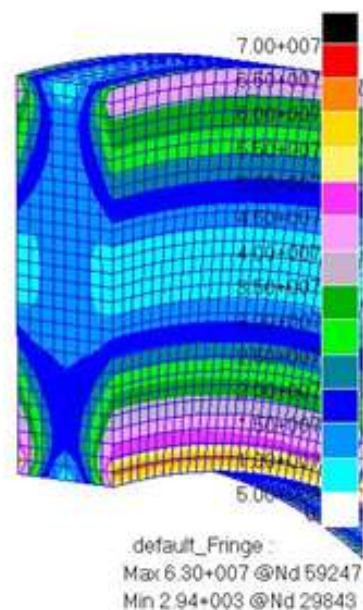


Рис.12. Фрагмент модели №4. Распределение напряжений по толщине диска

Модель диска №5 отличается от модели, представленной на рис. 4, лишь количеством слоев конечных элементов по толщине диска (14 слоев). Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в модели №5 показано на рис. 13...14..

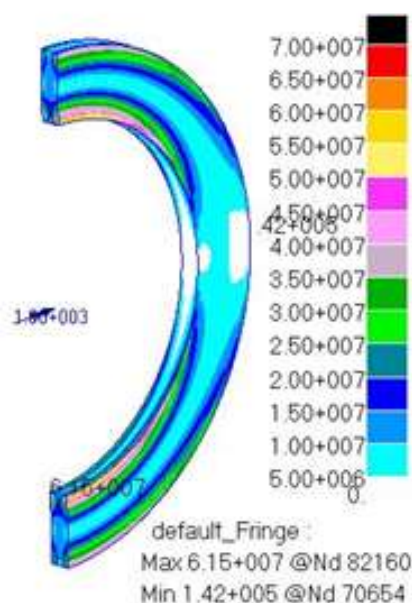


Рис.13. Модель №5. Общая картина распределение напряжений

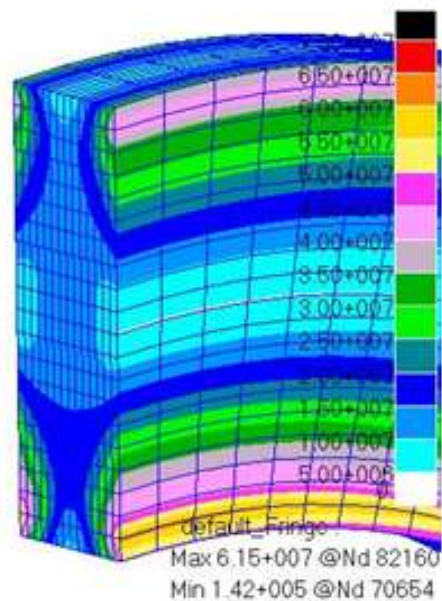


Рис.14. Фрагмент модели №5. Распределение напряжений по толщине диска

В таблице 1 приведено сравнение полученных результатов напряжений по толщине (координата z) диска (модели №1...№5).

Таблица 1. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу по толщине моделей диска

Координата z , мм	Напряжение, Па				
	Модель №1 1 слой	Модель №2 3 слоя	Модель №3 5 слоев	Модель №4 8 слоев	Модель №5 14 слоев
-5.0000	$4.09 \cdot 10^7$	$5.09 \cdot 10^7$	$5.75 \cdot 10^7$	$6.30 \cdot 10^7$	$6.15 \cdot 10^7$
-4.2857					$5.02 \cdot 10^7$
-3.7500				$4.08 \cdot 10^7$	
-3.5714					$3.78 \cdot 10^7$
-3.0000			$3.19 \cdot 10^7$		
-2.8571					$2.90 \cdot 10^7$
-2.5000				$2.40 \cdot 10^7$	
-2.1429					$2.22 \cdot 10^7$
-1.6667		$2.02 \cdot 10^7$			
-1.4286					$1.69 \cdot 10^7$
-1.2500				$1.44 \cdot 10^7$	
-1.0000			$1.48 \cdot 10^7$		
-0.7143					$1.32 \cdot 10^7$
0.0000				$1.02 \cdot 10^7$	$1.17 \cdot 10^7$
0.7143					$1.32 \cdot 10^7$
1.0000			$1.48 \cdot 10^7$		
1.2500				$1.44 \cdot 10^7$	
1.4286					$1.69 \cdot 10^7$
1.6667		$2.02 \cdot 10^7$			
2.1429					$2.22 \cdot 10^7$
2.5000				$2.40 \cdot 10^7$	
2.8571					$2.90 \cdot 10^7$
3.0000			$3.19 \cdot 10^7$		
3.5714					$3.78 \cdot 10^7$
3.7500				$4.08 \cdot 10^7$	
4.2857					$5.02 \cdot 10^7$
5.0000	$4.09 \cdot 10^7$	$5.09 \cdot 10^7$	$5.75 \cdot 10^7$	$6.30 \cdot 10^7$	$6.15 \cdot 10^7$

Из таблицы 1 следует, что максимальные напряжения в диске возникают в модели N4. Относительные погрешности максимальных напряжений в моделях относительно максимального напряжения в модели №5 приведены в таблице 2.

Таблица 2. Относительная погрешность расчета максимального эквивалентного напряжения (по Мизесу) в моделях диска по отношению к максимальному эквивалентному напряжению в модели №5

Модель	Модель №1	Модель №2	Модель №3	Модель №4	Модель №5
Погрешность	33.50%	17.24%	6.50%	2.44%	0

В таблице 3 приведено относительное количество вычислительных операций расчета эквивалентных напряжений в моделях диска (по отношению к количеству вычислительных операций для модели №1).

Таблица 3. Относительное количество вычислительных операций расчета эквивалентных напряжений в моделях диска (по отношению к количеству вычислительных операций для модели №1).

Модель:	Модель №1	Модель №2	Модель №3	Модель №4	Модель №5
Кол-во операций	1	$4.9 \cdot 10^3$	$2.9 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^9$

Нередко для заключения о работоспособности элемента конструкции необходимо знать не только уровень возникающих напряжений, но и характер их распределения по тому или иному направлению. Характер распределения напряжений по толщине диска в моделях №1...№5 приведены на рис. 15.

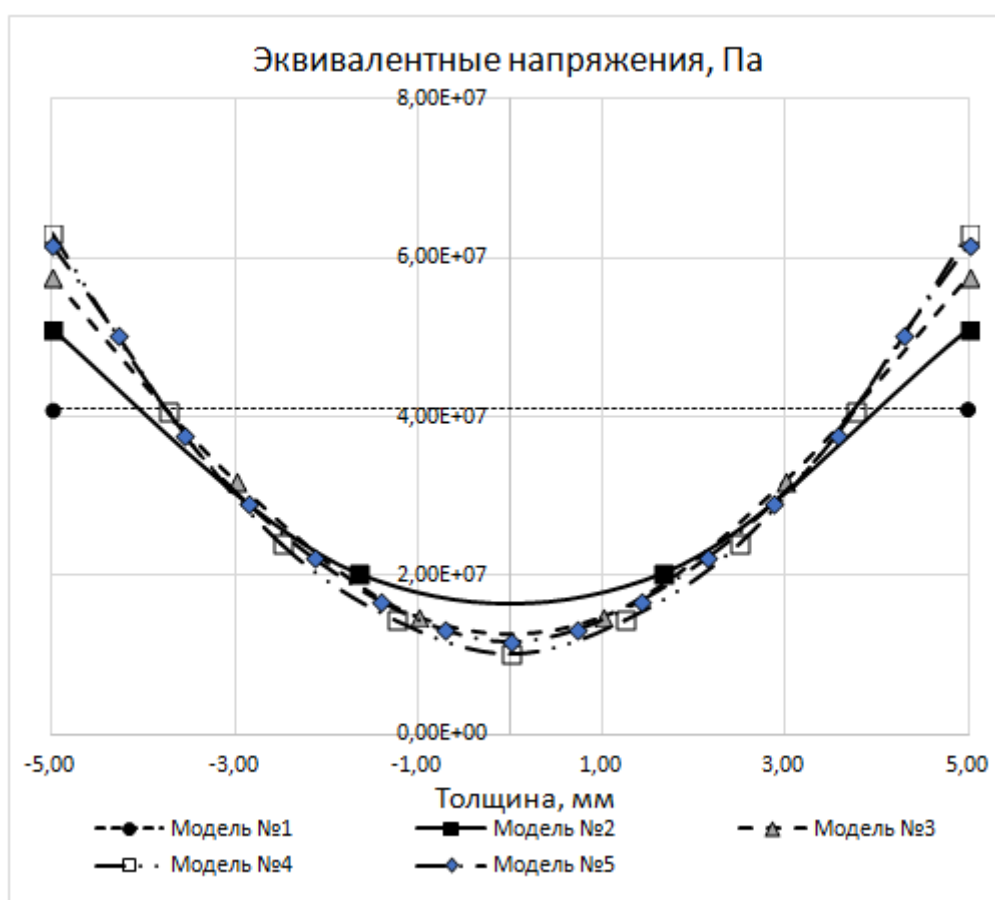


Рис.15. Распределение эквивалентных напряжений по толщине диска в моделях №1...№5

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для получения необходимой точности оценки максимальных эквивалентных напряжений методом конечных элементов необходимо применять многослойные модели.

- многослойные конечноэлементные модели так же необходимы для получения более точного характера изменения напряжений в исследуемом элементе конструкции.
- с увеличением количество слоев уменьшается изменение вычисленного значения максимального напряжения, при этом увеличивается количество вычислительных операций. С определенного количества слоев дальнейшее его увеличение не рационально, так как практически не дает уточнения уровня напряжений и их распределения, однако приводит к значительному увеличению вычислительных операций. В рассматриваемом примере рациональное число слоев диска равно 5.

Заключение

Таким образом, учет вышеизложенного позволяет при определении НДС элемента конструкции получить более точное значения максимального напряжения, что особенно важно, когда в элементе конструкции возникают напряжения близкие к допускаемым. Выбор рационального количества слоев в модели позволяет получить необходимую точность результатов при минимальных затратах машинного времени. Кроме того, в случае превышения максимальных эквивалентных напряжений над допускаемыми в поверхностных слоях, рассмотрение многослойных моделей с оценкой толщины слоя, в котором напряжения превышают допускаемые, является необходимым условием для заключения о работоспособности элемента конструкции.

Список литературы

1. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. Пер. с англ. / Под ред Г.С. Шапиро. 3-е изд. М.: URSS, 2009. 635 с.[Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1959. 580 p.].
2. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Озон, 2012. 445 с. [Bathe K.-J., Wilson E.L. Numerical methods in finite element analysis. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1976. 528 p.].
3. MSC Nastran. Режим доступа: <http://www.mssoftware.ru/products/msc-nastran> (дата обращения: 29.09.2016).

Multilayer Finite-Element Model Application to Define the Bearing Structure Element Stress State of Launch Complexes

V.A. Zverev^{1,*}, V.V. Lomakin¹

^{*}zverev_vadim@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: mesh, finite element method, bearing structure, layer, tense state

The article objective is to justify the rationale for selecting the multilayer finite element model parameters of the bearing structure of a general-purpose launch complex unit.

A typical design element of the launch complex unit, i.e. a mount of the hydraulic or pneumatic cylinder, block, etc. is under consideration. The mount represents a set of the cantilevered axis and external structural cage. The most loaded element of the cage is disk to which a moment is transferred from the cantilevered axis due to actuator effort acting on it.

To calculate the stress-strain state of disk was used a finite element method. Five models of disk mount were created. The only difference in models was the number of layers of the finite elements through the thickness of disk. There were models, which had one, three, five, eight, and fourteen layers of finite elements through the thickness of disk. For each model, we calculated the equivalent stresses arising from the action of the test load. Disk models were formed and calculated using the MSC Nastran complex software.

The article presents results in the table to show data of equivalent stresses in each of the multi-layered models and graphically to illustrate the changing equivalent stresses through the thickness of disk.

Based on these results we have given advice on selecting the proper number of layers in the model allowing a desirable accuracy of results with the lowest run time. In addition, it is concluded that there is a need to use the multi-layer models in assessing the performance of structural elements in case the stress exceeds the allowable one in their surface layers.

References

1. Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. *Theory of plates and shells*. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1959. 580 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. *Plastinki i obolochki*. Moscow: URSS, 2009. 635 p.

2. Bathe K., Wilson E. *Numerical methods in finite element analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1976. 528 p. (Russ. ed.: Bathe K., Wilson E. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov*. Moscow: Ozon, 2012. 445 p.).
3. MSC Nastran. Available at: <http://www.mscsoftware.ru/products/msc-nastran>, accessed 29.09.2016.