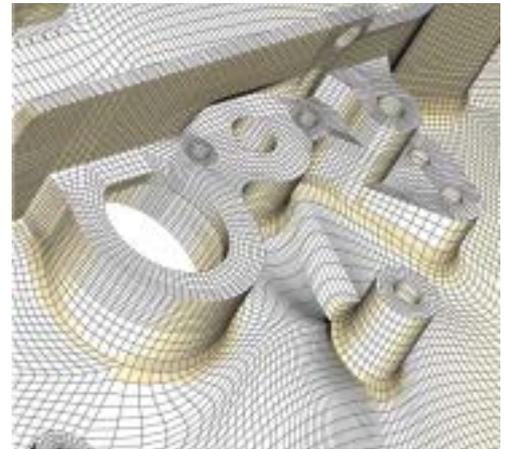


# Применение оболочечных и объемных элементов



## при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности

### 1. Область возможного применения расчетных моделей с использованием оболочечных и объемных конечных элементов при проектировании стальных конструкций

Расчетные модели с использованием оболочечных конечных элементов имеют ряд преимуществ по сравнению со стержневыми моделями, а в некоторых случаях их применение может дать существенный эффект с точки зрения как оптимизации конструкций, так и скорости, наглядности и простоте получения результатов расчета с использованием современных программных комплексов. К преимуществам оболочечных расчетных моделей можно отнести следующие:

- подробный и наглядный анализ напряженно-деформированного состояния;
- точный расчет на устойчивость в пределах упругих деформаций, что особенно важно при расчетах рам на основе сварных двутавров переменного сечения;
- существенно большие возможности выполнения различных видов нелинейного анализа, и как следствие — выявление и более полное использование имеющихся резервов по несущей способности в сравнении со стержневыми моделями;
- в отдельных случаях (например, при построении расчетной модели рамы на основе двутавров переменного сечения) оболочечную модель оказывается построить быстрее, чем ее стержневую аппроксимацию стержневыми элементами постоянного сечения;
- возможность учета начальных несовершенств (например, кривизна стенки) или, при использовании

объемных элементов, грибовидности фланцев в соединениях с высокопрочными преднапряженными болтами;

- оболочечные модели с применением нелинейного деформационного расчета можно применять при построении таблиц коэффициентов  $\varphi$ ,  $\varphi_e$ ,  $\varphi_b$  для профилей, отличных от нормированных в СНиП;
- следует отметить также, что иногда методики СНиП вообще не позволяют выполнить анализ несущей способности, в таких случаях альтернативы моделям с применением оболочечных, а иногда и объемных элементов просто не существует.

Для эффективного использования оболочечных элементов при расчетах стальных конструкций следует разработать и верифицировать методики построения расчетных моделей и анализа результатов, а для внедрения в проектную практику необходимы удобные и действенные средства построения расчетных моделей. Значительная часть статьи посвящена вопросам верификации результатов расчета на тестовых моделях. Для расчетов использовались программы SCAD версии 11.3 и MSC.Visual Nastran for Windows версии 2004 (далее Nastran). В качестве тестовых расчетных моделей применялись такие, расчет которых можно выполнить с применением методик СНиП II-23-81\* или другой научной и технической литературы.

### 2. Расчет устойчивости стенок элементов двутаврового сечения в предположении упругой работы материала

С целью адекватного сопоставления с результатами расчета по СНиП II-23-81\* [6] были использованы следующие

положения пособия к указанному СНиП [5]:

- согласно п. 7.6, стенки балок, в которых действуют все компоненты напряженного состояния ( $\sigma$ ,  $\tau$  и  $\sigma_{loc}$ ), рассчитываются в предположении упругой работы материала (указанное положение позволяет использовать расчет устойчивости в линейно-упругой постановке, реализованный в программе SCAD и других комплексах);
- согласно п. 7.8, устойчивость стенок балок проверяется с учетом их частичного защемления в поясах, степень которого при упругой работе балки зависит от соотношения жесткостей пояса и стенки; эффект защемления стенки поперечными ребрами жесткости не учитывается, и в местах их постановки принимается шарнирное опирание кромок (последнее положение в расчете по СНиП создает некоторый запас устойчивости, но при построении тестовых моделей не учитывалось, то есть сопряжение ребер жесткости со стенкой принято жестким);
- согласно п. 7.8, формула (75)

$$\text{СНиП II-23-81*} \quad \sigma_{cr} = \frac{c_{cr} R_y}{\lambda_w^2} \quad (75)$$

дает минимальное значение критических напряжений при чистом изгибе,

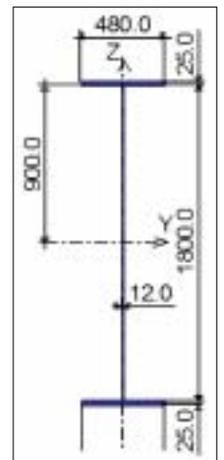


Рис. 2.1.1. Сечение балки

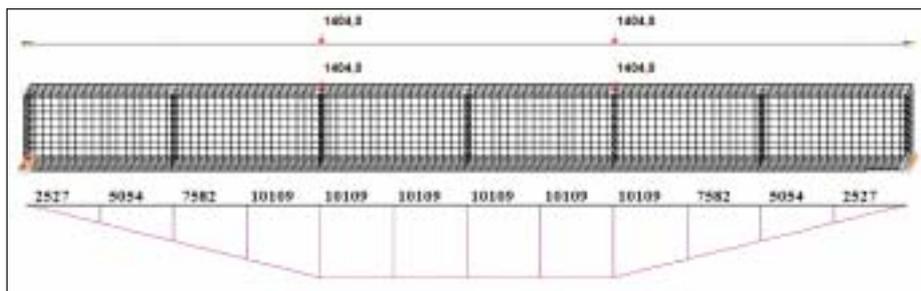


Рис. 2.1.2. Расчетные модели в программе SCAD (сверху – стержневая, снизу – оболочечная), эпюра М кНм

которые соответствуют отношению длины отсека к его высоте  $a/h_{ef}=0,667$ ; если отношение  $a/h_{ef}$  не кратно 0,667, то критические напряжения будут выше (для адекватного сравнения соотношение длины отсека к его высоте принято равным 0,667).

**2.1. Тестовые расчеты устойчивости стенок двутавровых балок при чистом изгибе**

В качестве тестовой модели принята шарнирно опертая однопролетная балка пролетом 21,6 м, сечением согласно рис. 2.1.1, нагруженная двумя сосредоточенными силами согласно рис. 2.1.2. Толщина стенки менялась от 12 до 18 мм, что соответствует приведенным гибкостям стенки  $\bar{\lambda}_w$  6,14 и 3,41. Для исключения потери устойчивости по изгибно-крутильной форме верхний пояс закреплен из плоскости по ребрам жесткости.

В зоне центральных отсеков стенка потеряла устойчивость по 5-й форме с коэффициентом критической нагрузки 0,594. Первая и пятая формы потери устойчивости представлены на рис. 2.1.3.

Результаты сравнительного расчета представлены в таблице 2.1.1.

Для наиболее часто используемого диапазона условных гибкостей стенок – от 4 до 6 – результаты расчета устойчивости стенки при чистом изгибе в SCAD совпадают со СНиП с точностью до 4%, что очень хорошо укладывается в общепринятую точность инженерных расчетов.

**2.2. Тестовые расчеты устойчивости стенок двутавровых балок при действии преимущественно поперечной силы**

Тестовая модель принята аналогично п. 2.1, но нагрузка задана в виде равномерно распределенной по оси симметрии балки, приложенной к верхнему поясу интенсивностью 130 кН/м. Расчетные модели, а также эпюры М и Q представлены на рис. 2.2.1.

В крайнем отсеке с преобладающим внутренним усилием в виде поперечной силы стенка потеряла устойчивость по первой форме (рис. 2.2.2) с коэффициентом критической нагрузки  $\lambda=0,681$ .

Результаты сравнительного расчета представлены в таблице 2.2.1.

В таблице 2.2.1 и далее аббревиатура КЗУ означает коэффициент запаса устойчивости. В качестве КЗУ СНиП принята величина  $1/\sqrt{(\sigma/\sigma_{cr})^2 + (\tau/\tau_{cr})^2}$

В наиболее часто используемом диапазоне условных гибкостей стенок – от 4 до 6 – результаты расчета устойчивости стенки в SCAD при превалирующем действии касательных напряжений совпадают со СНиП с точностью до 8%, что является вполне удовлетворительным показателем.

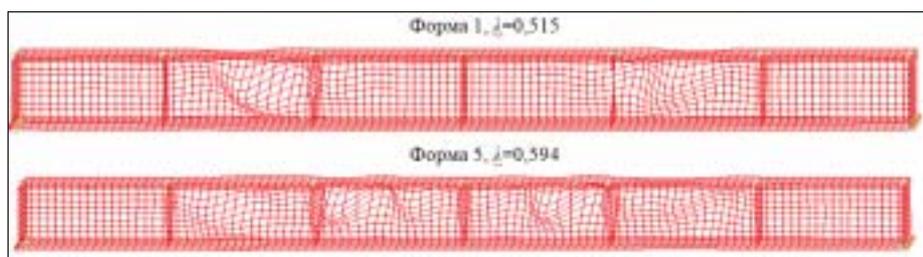


Рис. 2.1.3. Формы потери устойчивости и коэффициенты критической нагрузки (толщина стенки – 10 мм), полученные в программе SCAD (? – коэффициент критической нагрузки)

$h_w$ мм	$t_w$ мм	$\sigma$ МПа	$R_y$ кН/см <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}_w$	$\bar{\lambda}_{cr}$	M кНм	$\sigma$ кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_{cr}/\sigma$ при $\beta=0,8$	$\sigma_{cr}/\sigma$ при $\beta=0,8$	Коефф. запаса уст. Scad	Разница со СНиП %
1800	10	3600	24	6,14	6,14	10108,8	36,62	0,62	0,593	0,594	0,11
1800	12	3600	24	5,12	5,12	10108,8	35,24	0,92	0,862	0,880	2,07
1800	14	3600	24	4,39	4,39	10108,8	33,96	1,3	1,170	1,199	2,44
1800	16	3600	24	3,84	3,84	10108,8	32,77	1,76	1,494	1,440	-3,75
1800	18	3600	24	3,41	3,41	10108,8	31,66	2,31	1,952	1,770	-10,29

Таблица 2.1.1. Результаты сравнительного анализа расчета устойчивости стенки при чистом изгибе в SCAD со СНиП II-23-81\*

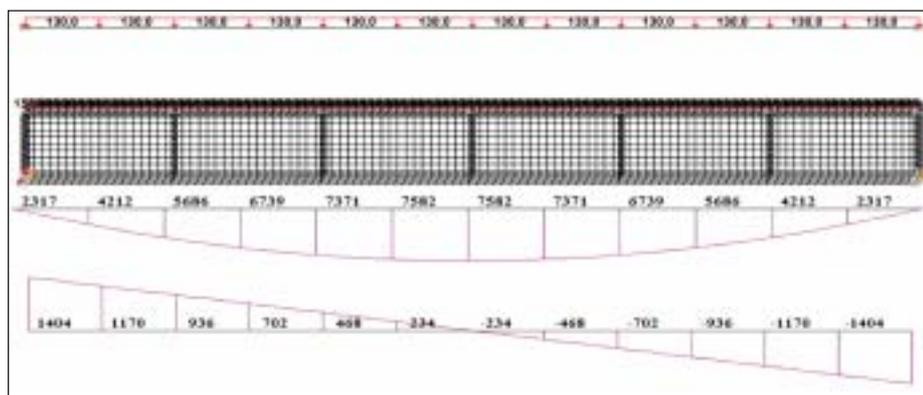


Рис. 2.2.1. Расчетные модели в программе SCAD (сверху – стержневая, снизу – оболочечная), эпюра М кНм и Q кН

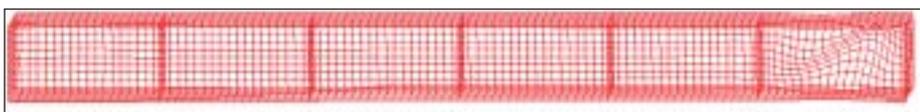


Рис. 2.2.2. Форма потери устойчивости стенки балки в опорном отсеке

$h_w$ мм	$t_w$ мм	$\bar{\lambda}_w$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=0,8$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=0,8$	$Q_y$ кН/см <sup>2</sup>	M кНм	Q кН	$\sigma$ кН/см <sup>2</sup>	$\tau$ кН/см <sup>2</sup>	КЗУ СНиП $\beta=0,8$	КЗУ СНиП $\beta=0,8$	КЗУ Scad	Разница со СНиП %
1800	10	6,14	22,57	21,75	4,52	1158,3	1287	4,2	7,15	0,628	0,627	0,681	7,88
1800	12	5,12	32,5	30,37	6,51	1158,3	1287	4,04	6,96	1,062	1,061	1,119	2,48
1800	14	4,39	44,24	39,73	8,86	1158,3	1287	3,88	6,11	1,719	1,710	1,630	-5,2
1800	16	3,84	57,78	48,96	11,57	1158,3	1287	3,76	4,47	2,553	2,540	2,218	-15,54
1800	18	3,41	73,13	61,6	14,84	1158,3	1287	3,63	3,97	3,827	3,803	2,878	-26,36

Таблица 2.2.1. Результаты сравнительного анализа расчета устойчивости стенки при превалирующем действии касательных напряжений в SCAD со СНиП II-23-81\*

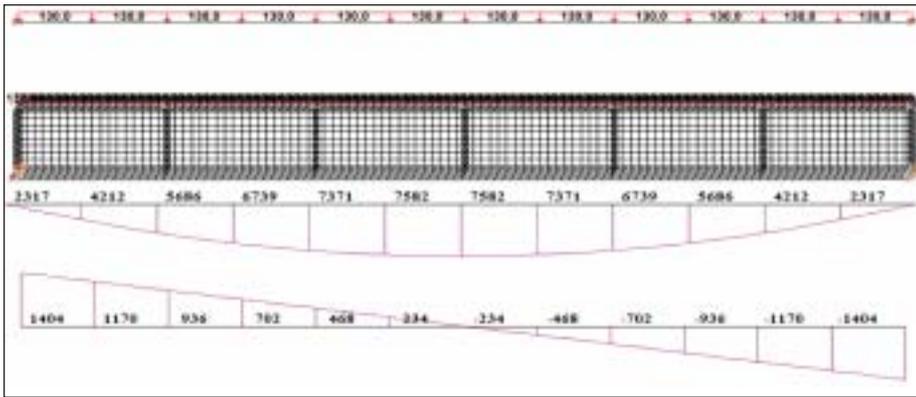


Рис. 2.3.1. Расчетные модели в программе SCAD (сверху – стержневая, снизу – оболочечная), эпюра  $M$  кНм и  $Q$  кН



Рис. 2.3.2. Форма потери устойчивости стенки балки в опорном отсеке у средней опоры

$h_w$ , мм	$t_w$ , мм	$\lambda$	$\lambda_{cr}$	$\beta_{cr}$ , град	$\beta_{cr}$ , град	$\lambda_{cr}$	$M$ , кНм	$Q$ , кН	$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\tau$ , Н/мм <sup>2</sup>	КСУ СНиП $\beta=0,8$	КСУ СНиП $\beta=0,8$	КСУ Scad	Разница по СНиП %
1800	10	24	8,14	22,57	21,72	4,52	8107,4	1838	22,32	9,1	0,447	0,442	0,464	4,48
1800	12	24	5,12	32,9	30,37	6,55	8107,4	1838	21,39	7,58	0,748	0,735	0,736	0,08
1800	14	24	4,25	44,24	38,73	8,36	8107,4	1838	20,52	6,5	1,152	1,116	1,067	-4,48
1800	16	24	3,64	57,78	48,96	11,57	8107,4	1838	19,8	5,69	1,669	1,571	1,462	-12,2
1800	18	24	3,41	73,13	61,8	14,84	8107,4	1838	19,13	5,06	2,309	2,157	1,885	-14,47

Таблица 2.3.1. Результаты сравнительного анализа расчета устойчивости стенки при совместном действии поперечной силы и изгибающего момента в SCAD со СНиП II-23-81\*

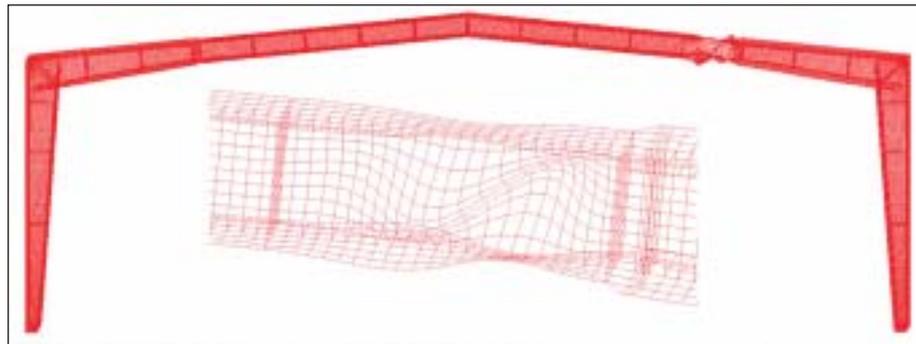


Рис. 2.4.1. Потеря устойчивости стенки рамы пролетом 36 м из сварных двутавров переменного сечения по первой форме в программе SCAD. Коэффициент запаса устойчивости – 1,76

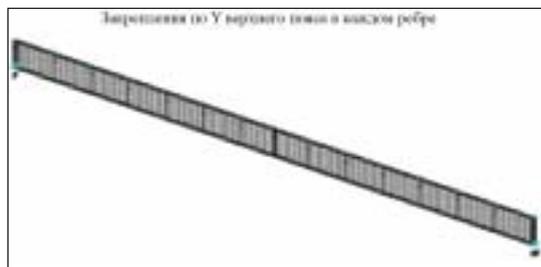


Рис. 3.1.1. Общий вид расчетной модели балки с гибкой стенкой в программе Nastran

### 2.3. Тестовые расчеты устойчивости стенок двутавровых балок при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

В качестве тестовой модели принята шарнирно опертая двухпролетная балка с размером пролета 21,6 м, остальные параметры модели – как для п. 2.2. Расчетные модели, а также эпюры  $M$  и  $Q$  представлены на рис. 2.3.1.

В отсеке у средней опоры в зоне совместного действия максимального  $M$  и  $Q$  стенка потеряла устойчивость по первой форме (рис. 2.3.2) с коэффициентом критической нагрузки  $\lambda=0,464$ .

Результаты сравнительного расчета представлены в таблице 2.3.1. В наиболее часто используемом диапазоне условных гибкостей стенок от 4 до 6 результаты расчета устойчивости стенки в

SCAD при совместном действии  $M$  и  $Q$  совпадают со СНиП с точностью до 5%, что укладывается в общепринятую точность инженерных расчетов.

### 2.4. Пример расчета устойчивости стенки рамы из сварных двутавров переменной высоты

На рис. 2.4.1. представлена потеря устойчивости стенки рамы пролетом 36 м по

первой форме, коэффициент запаса устойчивости, полученный в программе SCAD, составил 1,76. Выполненный расчет устойчивости стенки в данном случае позволил отказаться от громоздких вычислений по СНиП, кроме того, точный расчет стенки элемента переменного сечения с учетом компонент  $N$ ,  $M$ ,  $Q$  по СНиП вообще не представляется возможным. Следует также отметить, что расчет в программе Nastran дал аналогичные результаты с разницей коэффициента критической нагрузки в третьем знаке после запятой.

## 3. Расчет несущей способности балок и рам на основе сварных двутавров переменного сечения в закритической области работы стенки

### 3.1. Тестовые расчеты балки с гибкой стенкой

В качестве тестовой расчетной модели была рассмотрена однопролетная шарнирно-опертая по краям балка, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой, с сечением в виде симметричного двутавра и следующими исходными данными:

- пролет балки – 30 м;
- интенсивность нагрузки – 18,19 кН/м;
- высота сечения  $h=1514$  мм;
- высота стенки  $h_w=1460$  мм;
- толщина стенки  $t_w=6$  мм
- толщина верхнего и нижнего поясов  $h_f=18$  мм;
- ширина верхнего и нижнего поясов  $b_f=310$  мм;
- марка стали – С245;
- шаг закреплений верхнего пояса из плоскости – от 3948 мм (в центре) до 4,28 м (ближе к краям);
- шаг односторонних поперечных ребер жесткости – от 1974 мм (два отсека в центре) до 2,14 м (остальные).

Значение момента в середине пролета  $M=2046$  кНм.

Предельное значение момента по формуле 159 СНиП II-23-81\*  $M_u=2231$  кНм. Результаты расчета прогибов по СНиП совместно с результатами расчета в программе Nastran приведены на рис. 3.1.3. Расчет в Nastran выполнен с использованием оболочечной модели, представленной на рис. 3.1.1. Закрепления по вертикали заданы по краям. По оси  $X$  – только с одной стороны. Закрепления по оси  $Y$  заданы в нижней части с двух сторон. Закрепление верхнего пояса из плоскости изгиба рассмотрено в двух вариантах:

- закрепление по каждому поперечному ребру жесткости (указанная модель в большей степени соответствует расчету по формуле 158 СНиП, поскольку не происходит потеря устойчивости по изгибно-крутильной форме);
- закрепления через поперечное ребро жесткости.

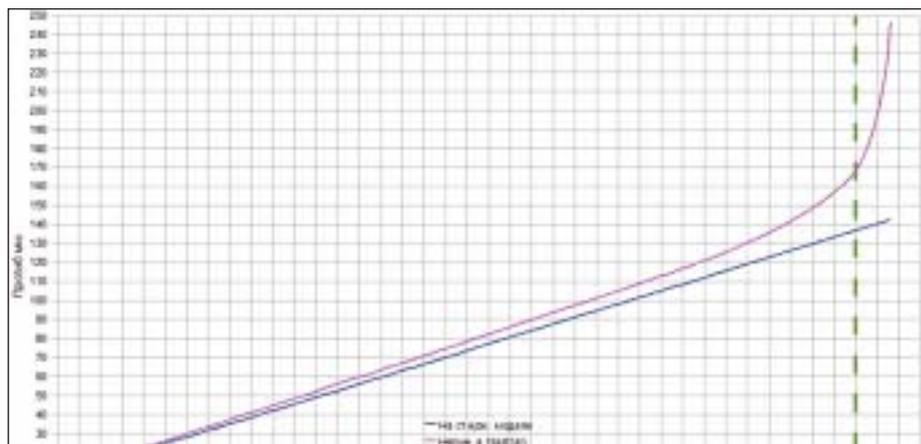


Рис. 3.1.2. Вертикальные прогибы при пошаговом нагружении

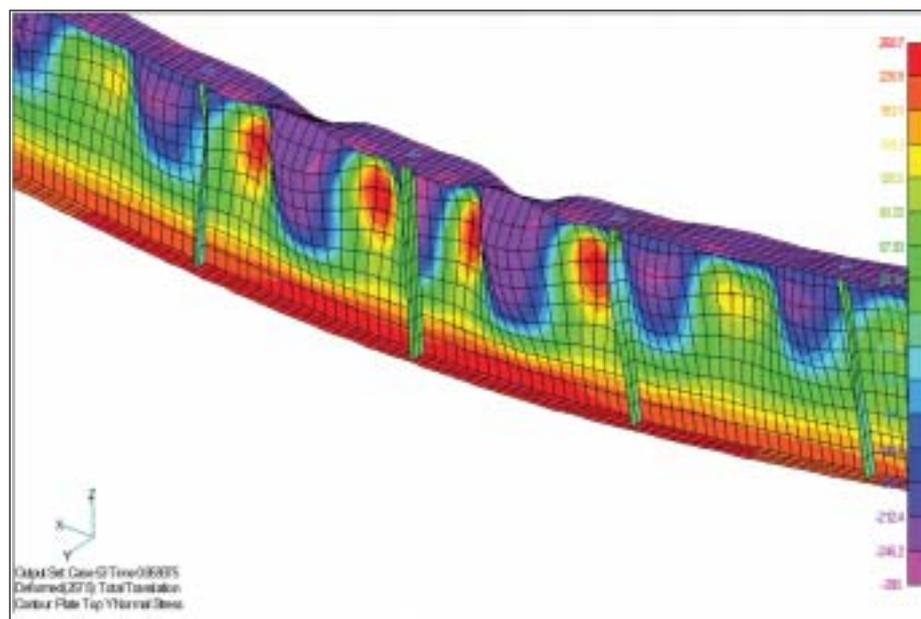
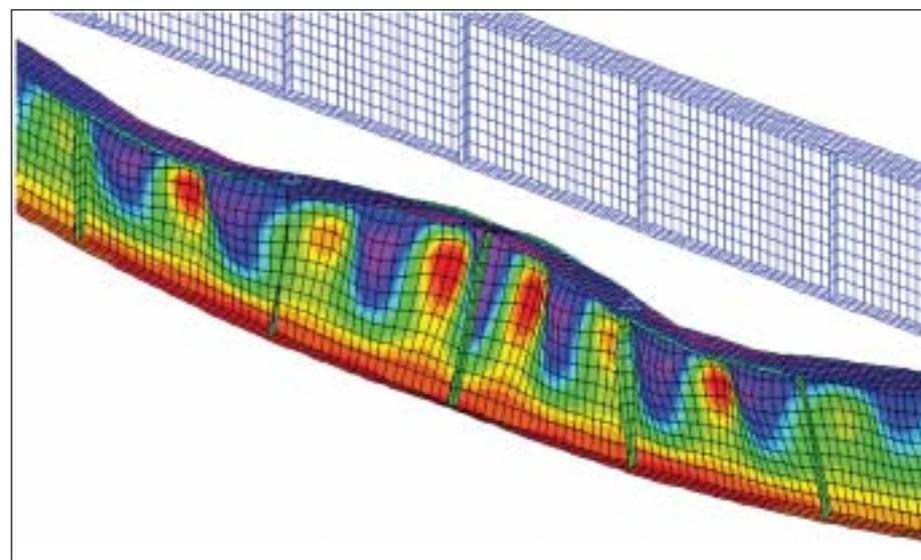
Рис. 3.1.3. Картина напряженно-деформированного состояния, соответствующего шагу при  $q=19,508$  кН/м, принятому за момент потери несущей способности

Рис. 3.1.4. Напряженно-деформированное состояние балки в момент потери несущей способности для модели закреплений № 2

В качестве нелинейного материала использована модель упруго-пластического материала общего вида (*Plastic*).

Для задания функциональной зависимости между напряжениями и деформациями использовались унифицированные диаграммы работы стали в виде безразмерных напряжений и деформаций, приведенные в справочнике [3].

Вертикальные нагрузки приложены в узлах к верхнему поясу с коэффициентом 1,3 относительно расчетных, то есть  $1,3 \cdot 18,19 = 23,65$  кН/м. Коэффициент 1,3 введен с целью нахождения предела несущей способности за пределами расчетной нагрузки, поскольку итерационный процесс реализуется пошагово с увеличением множителя нагрузки от 0,05 до 1. Для моделирования начальной кривизны стенки, что необходимо для корректного выполнения нелинейного расчета, перпендикулярно к стенке приложена равномерно распределенная нагрузка. При выполнении расчетов был использован нелинейный статический анализ (*Nonlinear Static*), позволяющий в данном случае учесть нелинейное поведение материала и влияние деформаций на изменение геометрии конструкции.

Расчеты показали, что потеря устойчивости стенки происходит при загрузке балки 64% от расчетной нагрузки 18,19 кН/м, дальнейшие расчеты выполняются с выключением части стенки из силовой работы.

Для выявления момента потери несущей способности был использован метод нелинейного деформационного анализа, при котором в качестве критерия потери несущей способности принимается начало резкого роста деформаций.

Значения нагрузок по шагам итерационного процесса и соответствующие этим нагрузкам прогибы, рассчитанные в программе Nastran, а также по стержневой модели без учета сдвиговых деформаций, но с учетом коэффициента  $\alpha=0,93$ , рассчитанного согласно п. 18.8\* СНиП II-23-81\*, приведены на рис. 3.1.2 в виде графика.

Картина напряженно-деформированного состояния центральной части балки, соответствующая шагу, принятому за момент потери несущей способности, представлена на рис. 3.1.3.

Для модели закреплений № 2 (шаг закреплений верхнего пояса принят через ребро) потеря несущей способности сопровождается выпучиванием сжатого пояса из плоскости изгиба в соответствии с рис. 3.1.4.

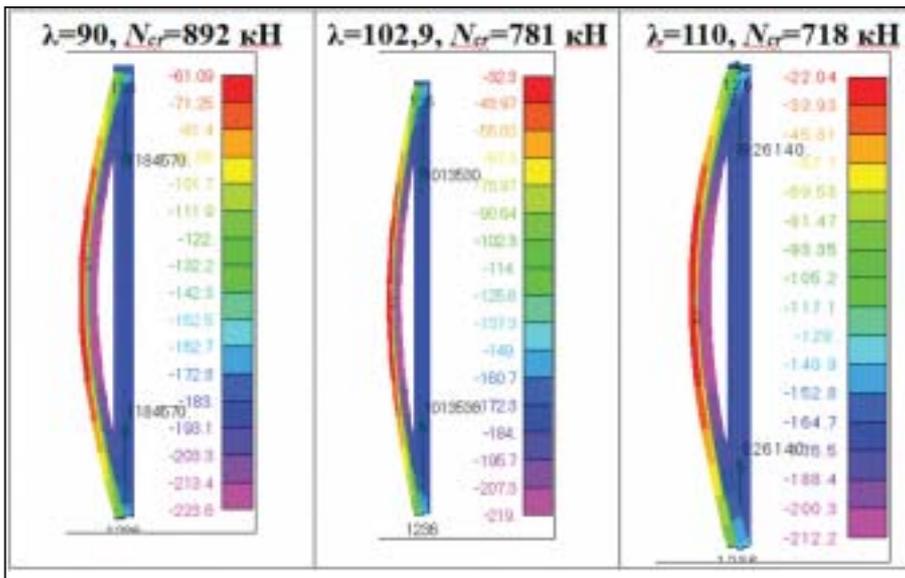


Рис. 3.2.1. Картины напряженно-деформированного состояния для гибкостей 90, 102,9, 110 и соответствующие им критические силы по результатам нелинейного деформационного анализа на основе нелинейного статического расчета в программе Nastran

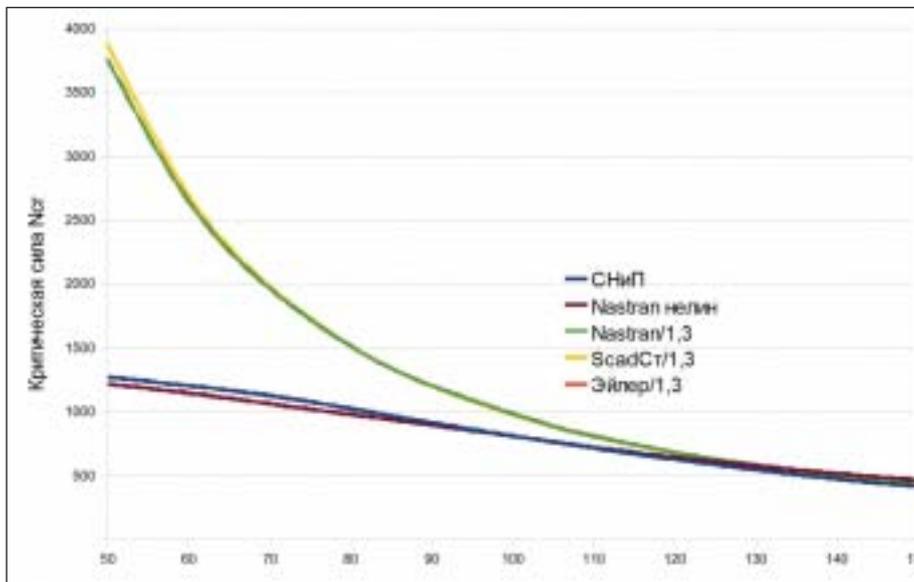


Рис. 3.2.2. Графики зависимости критической силы от гибкости и. Графики SCADst/1,3 и Эйлер/1,3 совпадают

**Выводы**

Предельная нагрузка, определенная по СНиП II-23-81\*:

$$q_{\text{СНиП}} = qMu/M = 18,19 \cdot 2231 / 2046 = 19,83 \text{ кН/м.}$$

Предельная нагрузка, рассчитанная в Nastran:

$$q_{\text{Nastran}} = 19,508 \text{ кН/м.}$$

Разница:  $100 \cdot (19,508 - 19,83) / 19,83 = -1,62 \%$ .

Расчет в нелинейной постановке с использованием упруго-пластичной модели материала общего вида с применением унифицированной диаграммы согласно работе [3] соответствует нормативному по несущей способности с погрешностью 1,62%, что более чем достаточно для инженерных расчетов.

**3.2. Тестовые расчеты центрально-сжатых стержней с применением оболочечных моделей**

Согласно п. 5.7 и 5.3 пособия [5],

$$e_b = \frac{i}{20} + \frac{l}{750}$$

требования по проверке устойчивости центрально-сжатых стержней установлены в СНиП II-23-81\* на основе расчета внецентренно-сжатых стержней с учетом влияния формы сечения, начального искривления оси, случайного эксцентриситета сжимающей силы.

При вычислении значений коэффициентов  $j$  типы поперечных сечений сжатых элементов принимались в соответствии с табл. 73 СНиП II-23-81\*, а начальные несовершен-

ства  $e_b$  – по формуле (19) пособия [5]. Согласно пособию [5], при нормировании коэффициентов  $\phi$  определялась также критическая сила упругих идеальных стержней по методу Эйлера. Окончательные значения коэффициентов  $\phi$  принимались наименьшими из двух: вычисленных с учетом начальных несовершенств или по методу Эйлера с введением коэффициента надежности  $\gamma_c = 1,3$ .

Автором были проведены расчеты стержневых моделей на устойчивость в программе SCAD и оболочечных моделей в программе Nastran как в упругой постановке (*Buckling*), так и в нелинейной постановке (*Nonlinear Static*). Известно, что при расчете на устойчивость в упругой постановке эксцентриситет приложения нагрузки не влияет на значение критической силы, расчеты оболочечных моделей на устойчивость в упругой стадии в программах SCAD и Nastran дают такие же результаты. При расчетах в программе Nastran с применением оболочечных моделей и нелинейного статического анализа (*Nonlinear Static*) эксцентриситет приложения нормальной силы был задан согласно методике пособия [5], а значение – по представленной выше формуле (19) пособия [5]. Расчеты были выполнены в диапазоне гибкостей от 50 до 150 для двутавра сечением 20К2 по СТО АСЧМ, что позволило исключить преждевременную потерю устойчивости стенки или поясов. Картины напряженно-деформированного состояния для гибкостей 90, 102,9 и 110 представлены на рис. 3.2.1. Результаты расчета критической силы по СНиП, а также в программах SCAD на стержневой модели и Nastran на оболочечной модели приведены на рис. 3.2.2. При выполнении нелинейного деформационного анализа в качестве критической силы принимался шаг нагружения, при котором начинался резкий рост поперечных прогибов.

На рис 3.2.2. приняты следующие обозначения:

- *СНиП* – критическая сила, определенная по формуле (7) СНиП II-23-81\*  $N_{cr} = \phi AR\gamma$ ;
- *Эйлер/1,3* – критическая сила, рассчитанная по формуле Эйлера с делением на 1,3;
- *SCADst/1,3* – критическая сила, рассчитанная в SCAD на стержневой модели с делением на 1,3;
- *Nastran/1,3* – критическая сила, рассчитанная в Nastran на оболочечной модели в линейно-упругой постановке с делением на 1,3;
- *Nastran нели* – критическая сила, рассчитанная путем выполнения нелинейного деформационного анализа на основе нелинейного статического расчета в программе Nastran.

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. При  $\lambda > 130 > \pi \sqrt{\frac{E}{R_y}}$

критическая сила общей потери устойчивости при решении задачи в линейной постановке с определением критической силы по формуле Эйлера на стержневой и оболочечной модели с делением на 1,3 отличается от СНиП на 6-7%.

2. В диапазоне рабочих гибкостей колонн от 80 до 120 расчет в линейной постановке дает погрешность от 70 до 30% (без учета коэффициента 1,3). В указанном диапазоне нелинейный деформационный анализ совпадает со СНиП в пределах 5%, что является достаточным для инженерных расчетов.

3. При  $\lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{нц}}}$

критическая сила, определенная на оболочечной модели путем нелинейного деформационного анализа, полностью совпадает с критической силой, определенной по СНиП.

4. Таким образом, при гибкостях более 130 расчет на устойчивость при центральном сжатии с применением оболочечной модели следует выполнять в линейной постановке с использованием коэффициента надежности 1,3.

5. При гибкостях от 110 до 130 оболочечные модели для расчета устойчивости при центральном сжатии можно применять, только выполняя нелинейный деформационный анализ на основе нелинейного статического расчета, при этом дополнительные коэффициенты запаса можно принимать не более 5%.

6. При гибкостях менее 110 оболочечные модели для расчета устойчивости при центральном сжатии можно применять, только выполняя нелинейный деформационный анализ на основе нелинейного статического расчета, при этом дополнительные коэффициенты надежности не нужны.

**3.3. Пример расчета рамы с учетом закри- тической работы стенки**

Представленные в п. 3.1. и 3.2. результаты тестовых расчетов подтверждают хорошую сходимость моделей на оболочечных элементах при нелинейном статическом расчете в Nastran с расчетом по СНиП, что позволяет применять разработанную методику для оценки несущей способности рамных конструкций на основе сварных двутавров переменного сечения с учетом в закри- тической области работы стенки.

На рис. 3.3.1. и 3.3.2. представлена картина напряженно-деформированного состояния рамы пролетом 48 м каркаса легкоатлетического манежа. Сопряжение ригеля рамы с колоннами – жесткое, колонн с фундаментами – шарнирное. Стенка в зоне конька теряет устойчивость при загруженности 0,907 от расчетной нагрузки. Нелинейный деформационный анализ на основе нелинейного статического расчета в программе Nastran выявил запас несущей способности в раме относительно расчетных нагрузок – 19%. Точный поверочный расчет по СНиП П-23-81\* в данном случае не представляется возможным в связи с переменной высотой стенки ригеля, более развитым нижним поясом, а также наличием существенного нормального усилия в ригеле, равного 60 т.

**4. Применение объемных элементов при расчете фланцевых соединений на высокопрочных болтах с предварительным натяжением**

**4.1. Проблемы, возникающие при производстве стальных конструкций с применением фланцевых соединений**

При производстве стальных конструкций с применением фланцевых стыков на высокопрочных преднапряженных болтах во фланцах часто возникают остаточные деформации в форме грибовидности.

Существующие рекомендации, разработанные ЦНИИПСК в 1989 г., предъявляют жесткие требования к изготовлению фланцев, которые зачастую могут быть выполнены только с применением дорогостоящей операции фрезеровки поверхности фланца, что на практике выполняется не каждым производителем. Указанные требования имеют обоснование, поскольку деформации фланца приводят к существенному увеличению доли внешней нагрузки на болты вследствие потери натяжения на преодоление начальных остаточных деформаций фланца, а в 1989 году не было таких расчетных возможностей, какие предоставляют современные программные комплексы.

Согласно данным монографии [2], грибовидность фланцев не влияет на их несущую способность при допущении пластических деформаций, но оказывает влияние на распределение усилий в преднапряженных высокопрочных болтах и

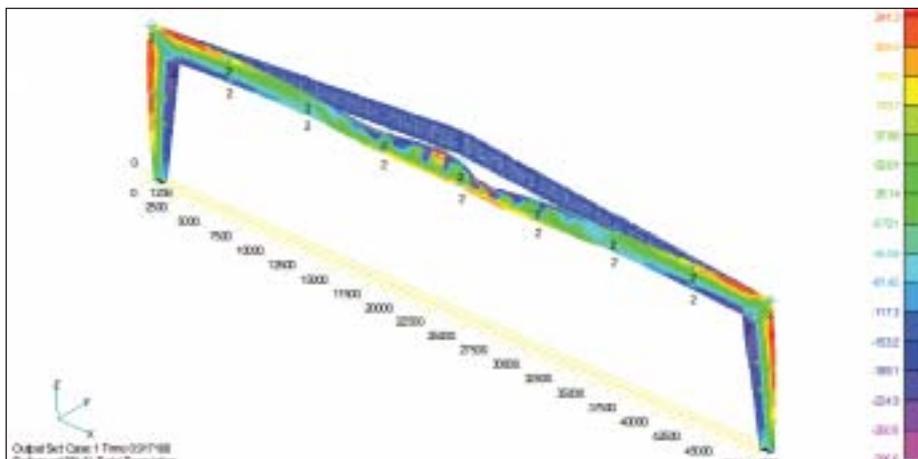


Рис. 3.3.1. Картина напряженно-деформированного состояния в момент потери несущей способности рамы пролетом 48 м при нелинейном статическом расчете в программе Nastran. Загруженность  $1,3 \cdot 0,917188 = 1,19$  (19% резерва несущей способности)

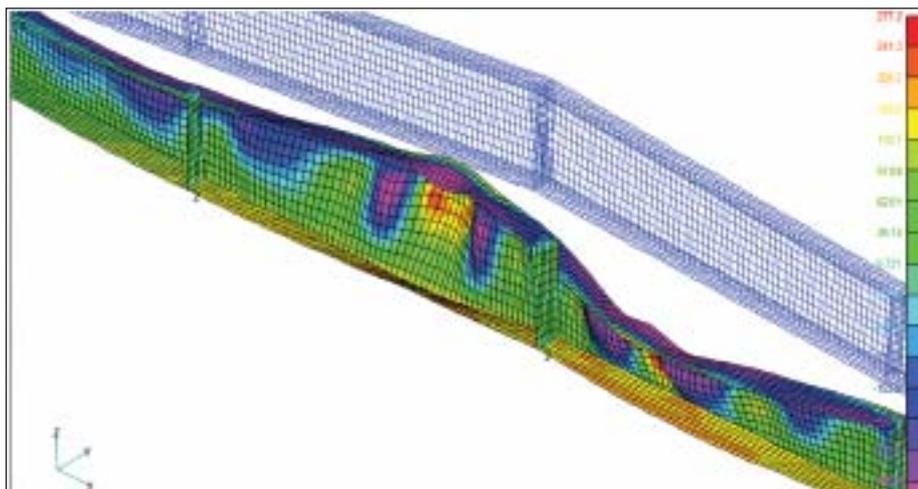


Рис. 3.3.2. Укрупненный фрагмент модели

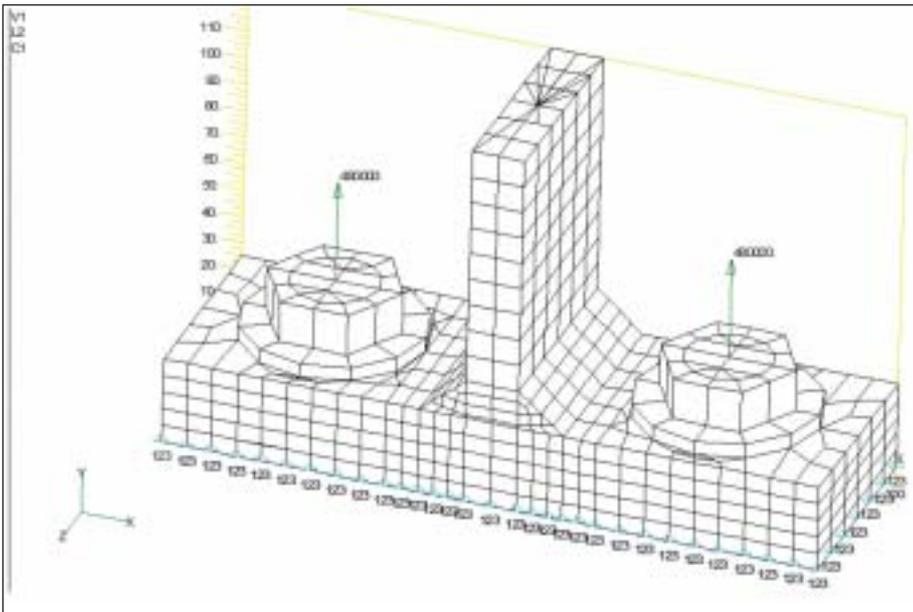


Рис. 4.2.1. Общий вид тестовой расчетной модели Т-образного фланца, нагруженного силами по осям болтов (размерность сил – Н, размеров – в мм)

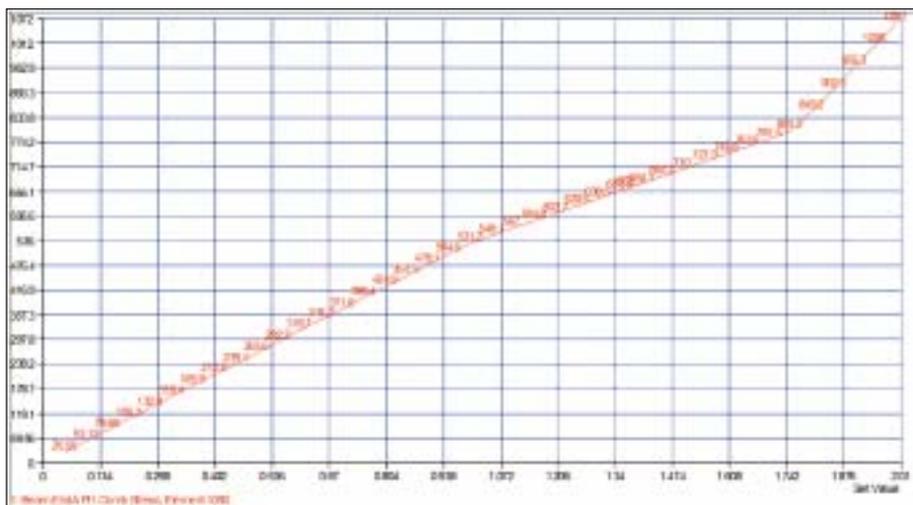


Рис. 4.2.2. График осевых напряжений в стержне болта (размерность напряжений – Н/мм<sup>2</sup>)

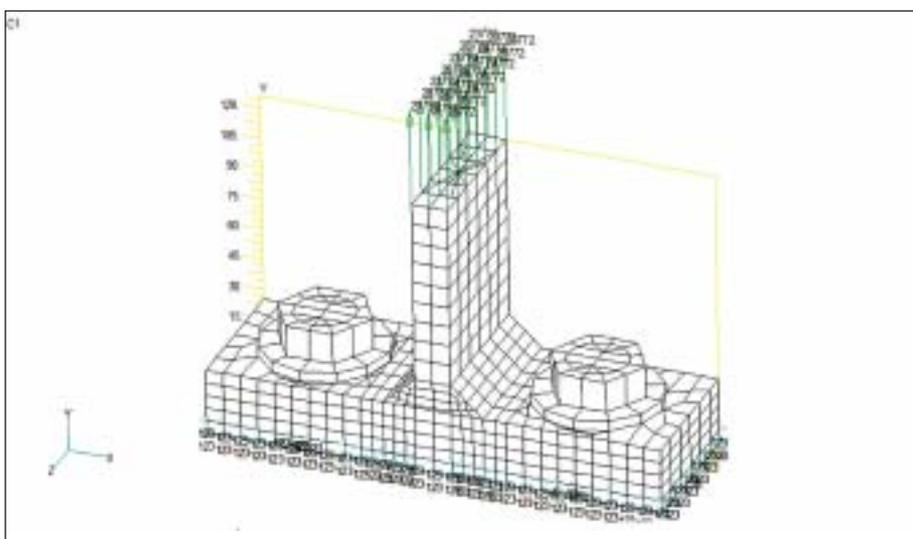


Рис. 4.2.3. Общий вид модели Т-образного фланца

на долю внешней нагрузки, передаваемой на болты, что может привести к их разрушению, потере несущей способности соединения и обрушению конструкции.

На принятие решения о пригодности к эксплуатации конструкций с дефектами во фланцах или о способах их доработки в современных условиях, при жестких сроках на изготовление и поставку стальных конструкций, должно уходить не более 1–2 дней. Такие сроки принятия решений вполне возможны при наличии подробной расчетной модели фланцевого стыка без учета остаточных деформаций, а также наличии технологии расчета с учетом остаточных деформаций. Далее представлены контуры такой технологии на примере расчета тестовых моделей Т-образного фланца.

#### 4.2. Тестовые модели Т-образных фланцев на основе объемных конечных элементов

Тестовая расчетная модель Т-образного фланца без дефектов, с нагрузкой, приложенной по оси болта, выполненная в программе Nastran, приведена на рис. 4.2.1. Данная модель использована для сравнения усилий натяжения в болтах с результатами, представленными в научной и технической литературе. Моделирование стержня болта выполнено с использованием конечного элемента типа *Beam*. Материал всех элементов – линейно-упругий. Толщина фланца – 25 мм, диаметр болтов – 24 мм. Условия контакта в плоскости симметрии (нижняя плоскость модели) заданы с помощью элементов односторонней связи *Gap*. Для решения контактной задачи расчет осуществлен в нелинейной постановке (*Nonlinear Static*) с учетом последовательного приложения натяжения болтов, а затем – внешней нагрузки. Моделирование натяжения болтов выполнено температурными нагрузками. На рис. 4.2.1. представлен график изменения напряжений в элементе, моделирующем стержень болта.

График, приведенный на рис. 4.2.2, имеет следующие характерные точки:

- осевое напряжение в стержне болта, равное 53,12 кН/см<sup>2</sup>, при SetValue=1 соответствует окончанию пошагового приложения нагрузки от предварительного натяжения  $N=53,12 \cdot 4,524=240,31$  кН, где 4,524 см<sup>2</sup> – площадь нетто болта диаметром 24 мм;
- далее, от точки с осевым напряжением 53,12 кН/см<sup>2</sup> при SetValue=1 до точки с осевым напряжением 801,2 кН/см<sup>2</sup> при SetValue=1,75, участок графика соответствует приложению внешней нагрузки от 0 до  $0,75 \cdot 480=360$  кН, при которой происходит раскрытие фланца и передача всей последующей нагрузки на болты;

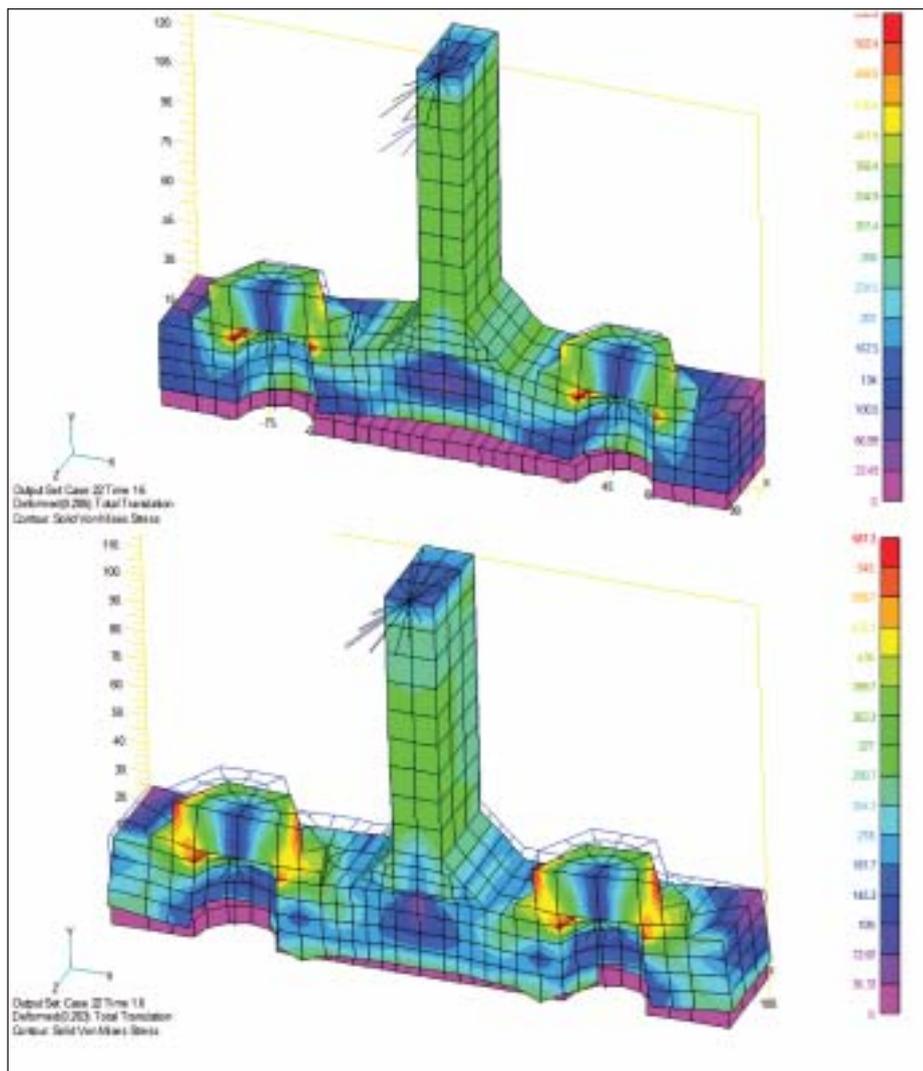


Рис. 4.2.4. Напряженно-деформированное состояние идеального (сверху) и грибовидного фланцев (снизу) при внешней нагрузке 60% от номинальной (в два раза больше несущей способности пояса)

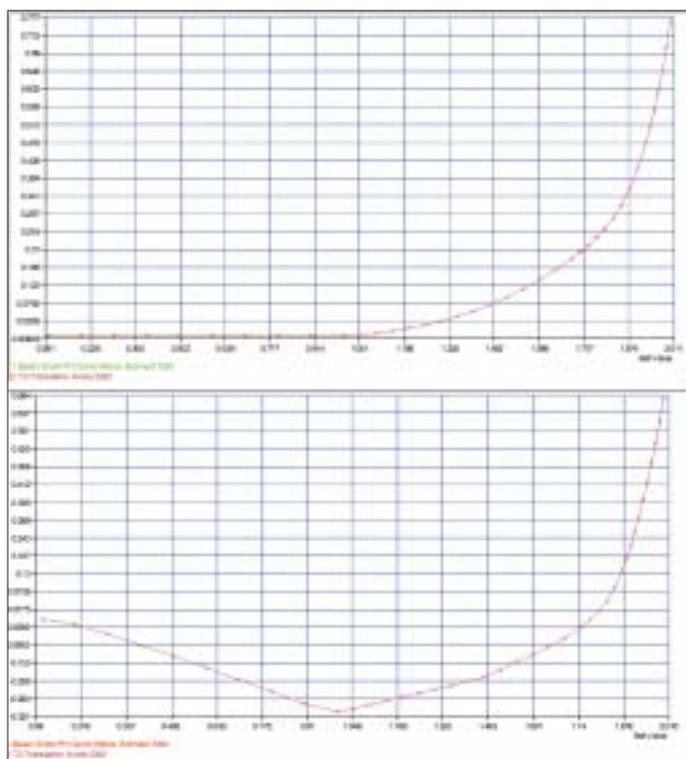


Рис. 4.2.5. Вертикальное перемещение узла в центре идеального (сверху) и грибовидного (снизу) фланцев при последовательном пошаговом приложении нагрузки сначала от натяжения болтов (SetValue от 0 до 1), затем внешней нагрузки (SetValue – от 1 до 2)

■ точка, при SetValue=2, с осевым напряжением 106,1 кН/см<sup>2</sup>, соответствует приложению всей внешней нагрузки  $N=106,1 \cdot 4,524=480$  кН, принятой в два раза больше несущей способности примыкающего к фланцу участка пояса.

Анализ графика, приведенного на рис. 4.2.2, показывает, что от начала приложения нагрузки до момента раскрытия фланца болтом воспринято 34% от внешней нагрузки. Согласно данным монографии [2], для аналогичного соединения коэффициент внешней нагрузки для высокопрочных болтов диаметром 24 мм  $\chi=0,157$ , что почти в 2,17 раза меньше полученных результатов. Указанная разница, очевидно, вызвана тем, что в расчетной модели не учтен ряд факторов, влияющих на податливость системы болт – гайка – шайба, например, податливость резьбы и разность податливости нарезной и ненарезной частей стержня болта. Неучтенные в расчетной модели факторы, влияющие на податливость, можно учесть, меняя диаметр или модуль упругости стержневого элемента, моделирующего болт, при выполнении настройки методики для применения в практических расчетах. Аналогично можно придумать способ построения модели без подробного моделирования головки болта и шайбы. Для определения эквивалентного диаметра стержневого элемента необходимо применить модель, соответствующую модели в виде конуса, которая была использована в монографии [2] для получения коэффициента внешней нагрузки, а также сопоставить результаты расчета с экспериментальными данными.

Далее представлены результаты расчета фланцев с нагрузкой, приложенной к соединенному с фланцем участку пояса толщиной 16 мм (рис. 4.2.3) для идеального фланца и фланца с грибовидностью в форме выпуклости вверх. Для участка пояса и стержня болта материал линейно-упругий. Для фланца, сварного шва, головки болта и шайбы – упруго-пластический билинейный (*Elasto-Plastic (Bi-Linear)*). Расчет выполнен в нелинейной постановке (*Nonlinear Static*). Для создания грибовидности написана программа, пересчитывающая координаты узлов по деформациям, вызванным специально заданным нагружением. Проблема задания параметров начального раскрытия элемента (*Initial Gap*) в элементах односторонней связи *Gap*, которая меняется от 0 по краям фланца до максимального 0,5 мм в центре фланца, также решена с помощью специально написанной программы. На рис. 4.2.3-4.2.6 представлены результаты расчета идеального и грибовидного фланцев.

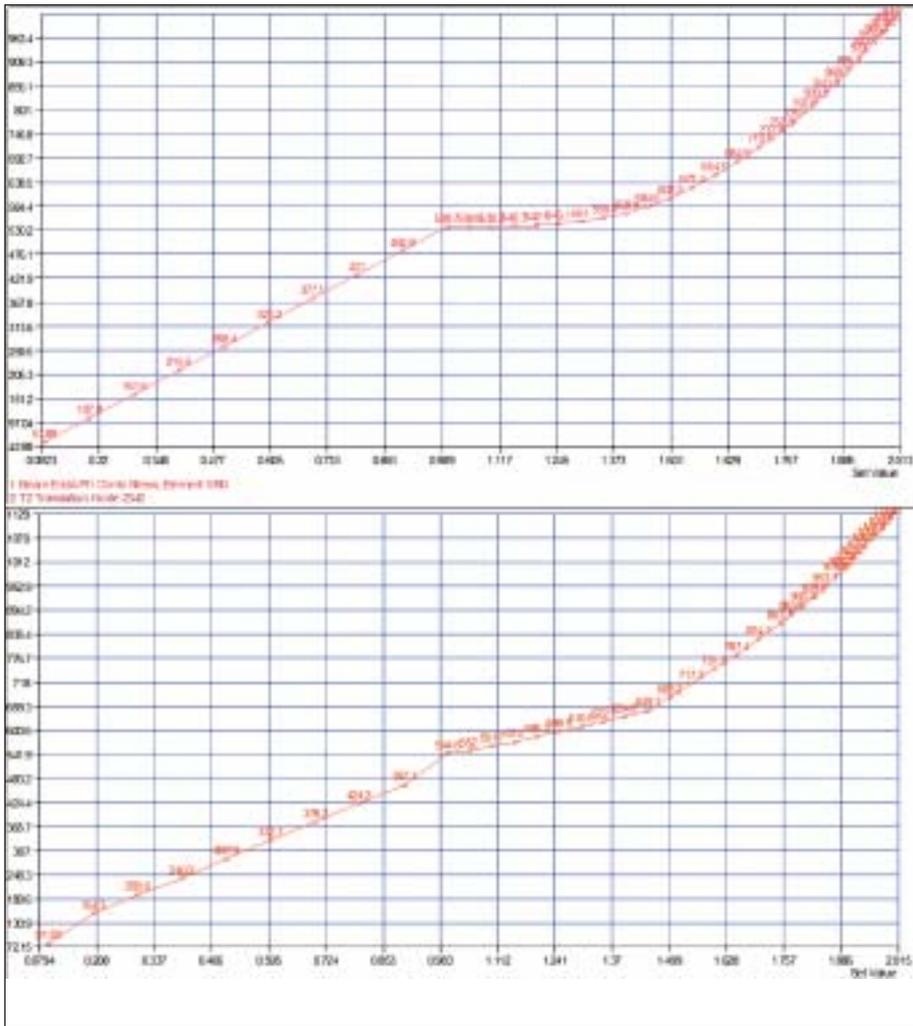


Рис. 4.2.6. Осевое напряжение в стержне болта идеального (сверху) и грибовидного (снизу) фланца

Анализ представленных выше графиков показывает, что несущая способность фланца исчерпывается при 80% внешней нагрузки, принятой по резкому росту перемещений.

Анализ осевых напряжений в болтах свидетельствует, что при 80% внешней нагрузки в модели с грибовидностью их значение составляет 90,64 кН/см<sup>2</sup>, а в модели без грибовидности – 79,76 кН/см<sup>2</sup>. При расчетном сопротивлении

стержня болта 77 кН/см<sup>2</sup> для фланца без грибовидности разрушение по болтам происходит при 77% от номинальной внешней нагрузки, а с грибовидностью – при 62%. При этом следует отметить, что несущая способность пояса исчерпывается при 50% номинальной нагрузки, то есть для фланца с грибовидностью запас несущей способности по болтам составляет 12% относительно несущей способности пояса. В приведенной модели па-

раметры фланца и грибовидности были взяты из реальной ситуации, с которой пришлось столкнуться автору, что подтверждает целесообразность выполнения подобных расчетов для принятия решения о возможности эксплуатации фланцевого соединения с деформациями фланцев в форме грибовидности или о необходимости их усиления. Очевидно, что описанная методика подходит и для расчета усиления соединения и вполне может применяться заводами-изготовителями металлоконструкций для обоснования отказа от трудоемких и затратных операций по фрезеровке фланцев.

### Литература

1. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, – М.: СКАД СОФТ, 2009.
2. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование строительства), – М.: Стройиздат, 2005.
3. Кузнецов В.В. Металлические конструкции. – В 3 т.; Т. 1. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. засл. строителя РФ, лауреата гос. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). – М.: АСВ. 1998.
4. Рычков С.П. MSC.visualNastran для Windows М.: НТ Пресс, 2004.
5. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\* "Стальные конструкции") / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
6. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. – М.: ЦПП, 2008.

*Андрей Теплых,*  
технический директор ООО "КБТ"  
E-mail: ateplykh@mail.ru

## ЗА РУБЕЖОМ

**Иновационные технологии Autodesk помогают лауреатам премии "Оскар" создавать поистине волшебные вещи**

*Создатели самых нашумевших картин года отдают должное специалистам по компьютерной графике, работающим в программах Autodesk*

В получившем мировое признание фильме "Начало", ставшем лауреатом премии "Оскар"-2011 в номинации "Лучшие визуальные эффекты", применялись программные решения компании Autodesk, которые на про-

тяжении уже многих лет активно используются в киноиндустрии для создания виртуальной реальности.

"Мы в восторге не только от победы такого киношедевра, как "Начало", но и от компании Double Negative, давнего клиента Autodesk, – говорит Марк Пети (Mark Petit), старший вице-президент Autodesk по разработке решений для графики и анимации. – Благодаря работе, проделанной командой Double Negative, зрители переносятся в ирреальное пространство сновидений глав-



ных героев, где плавно сочетаются цифровые элементы, спецэффекты и кадры с натуральным движением".

**Лучшие визуальные эффекты**

"Начало" – лауреат

В фильме "Начало" компания Double Negative, получившая премию Британской академии ки-

но и телевизионных искусств за визуальные эффекты, сумела создать незабываемый пейзаж, где сны и реальность причудливо переплетаются в единой истории о спасении самосознания главного героя. Специалистами компании был использован широкий арсенал программных средств, чтобы преобразить целый парижский квартал, возвести футуристические здания и обрушить в бушующее море полуразрушенные небоскребы.

**"Алиса в стране чудес" – номинант**



Фильм "Алиса в стране чудес" – это современная интерпретация классической сказки Льюиса Кэрролла, где компьютерные персонажи взаимодействуют с живыми актерами, многие из которых растянуты, сплюснены или каким-либо другим образом искажены с

помощью цифровых инструментов, гротескно отличаясь от своих реальных прототипов. Компания Sony Pictures Imageworks (SPI) использовала в этом проекте программные продукты Autodesk Maya, Autodesk Mudbox и Autodesk Flame.

"Мы очень гордимся проделанной работой и воздаем должное грандиозному таланту, вложенному в нее. Кен Ральстон и команда Imageworks использовали для воплощения творческих идей Тима Бертона все мыслимые и немыслимые технологии. Основой сложного процесса композитинга послужили программные решения Autodesk Maya. Для нас это большая честь – стать в своей отрасли компанией года", – говорит Роб Бредоу (Rob Bredow), технический директор SPI. Компания Third Floor также использовала Maya и Autodesk MotionBuilder для 263-кадровой предварительной визуализации фильма.

**"Железный человек 2" – номинант**



Студия ILM при помощи Maya и Flame создала для фильма "Железный человек 2" 527 визуальных эффектов, среди которых невероятные костюмы главного героя и потрясающая последовательность его механизированных

движений. "Возможности Maya сыграли неосценимую роль в создании анимации для "Железного человека 2". Новички нашей команды смогли практически сразу, без специального обучения, включиться в работу, а благодаря открытости программы нам удалось создать и настроить новые инструменты, позволившие вдохнуть жизнь в Железного человека и его военную машину", – говорит Марк Чу (Marc Chu), режиссер анимации студии ILM. Инструменты создания виртуальной реальности Autodesk были также

положены компанией Third Floor в основу работы над предварительной визуализацией (700 уникальных кадров).

**"Гарри Поттер и Дары смерти: часть 1" – номинант**

В продолжении знаменитого на весь мир сиквела о колдовстве, дружбе и смертельной опасности краски продолжают сгущаться. Студии MPC (180 кадров), Framestore (100 кадров), Baseblack (250 кадров), Cinesite (100 кадров), Double Negative (190



кадров) и Rising Sun Pictures создали сонм мистических персонажей, населяющих мир Гарри, – пожирателей смерти, дементоров; а также ошеломляющие превращения героев и их цифровых дублеров, напряженные схватки и слож-

нейшие спецэффекты пламени. Руководитель группы компьютерной графики компании Framestore Энди Кайнд (Andy Kind) рассказывает: "Maya стала нашим основным инструментом моделирования, разработки, анимации и создания спецэффектов. Комплекс функциональных возможностей программного продукта позволил нам создать таких персонажей, как Добби и Кикимер". Исполнительный продюсер компании Baseblack Стивен Элсон (Stephen Elson) в свою очередь добавляет: "В восьмидесяти наших кадрах использованы средства 3D-моделирования, а программа Autodesk Maya стала основой всех аспектов рабочего процесса".



**"Потустороннее" – номинант**

Фильм "Потустороннее" начинается с невероятно реалистичного воспроизведения картины опустошительного цунами, полностью разрушившего в 2004 году прибрежную полосу Таиланда. Для создания фото-

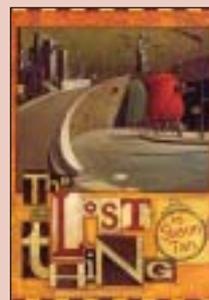
тореалистичной череды валов компания Scanline VFX использовала Autodesk 3ds Max. В этом продукте выполнялись моделирование, анимация и разработка оснастки, создавались своеобразные эффекты разрывающейся ткани и волос. Движение воды и огня формировалось с помощью собственной системы моделирования поведения жидкостей Flowline, которая тесно интегрирована с механизмами рендеринга в 3ds Max и V-Ray, а для построения движения толпы специалисты Scanline обратились к MotionBuilder. Стефан Троянски (Stephan Trojansky), режиссер визуальных эффектов компании Scanline: "Реализм – визитная карточка фильма Клинта Иствуда, и главной задачей при создании фильма "Потустороннее" было формирование убедительных визуальных эффектов, правдоподоб-

ных и при этом полностью управляемых. Работа над фильмом потребовала от нас совершенствования инструментов нашего собственного программного продукта Flowline, в частности относительно способов контроля поведения жидкостей и оптимизации рендеринга".

Решения Autodesk также оказали значительную помощь при создании фильмов, получивших премию "Оскар" и номинированных на нее в следующих категориях:

**Лучший анимационный короткометражный фильм**

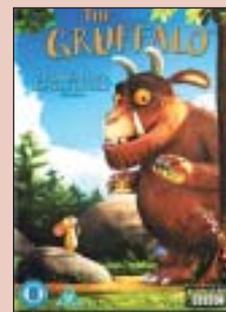
**"Потеря" – лауреат**



Режиссеры студии Passion Pictures Australia Эндрю Руэманн (Andrew Ruhe-mann) и Шон Тан (Shaun Tan) использовали комплекс программных продуктов для создания виртуальной реальности, чтобы рассказать историю о мальчике и найденном им на пляже существе. Autodesk Softimage использовался для моделирования, разработки оснастки, анимации, освещения, рендеринга и движения частиц, Autodesk Smoke – для онлайн-мастеринга и подгонки, а Autodesk Lustre – для цветокоррекции.

Autodesk Softimage использовался для моделирования, разработки оснастки, анимации, освещения, рендеринга и движения частиц, Autodesk Smoke – для онлайн-мастеринга и подгонки, а Autodesk Lustre – для цветокоррекции.

**"Груффало" – номинант**



Режиссеры киностудии Magic Light Pictures Якоб Шу (Jakob Schuh) и Макс Ланг (Max Lang) экранизировали одноименную книгу-картинку, используя сочетание Autodesk Maya для анимации, Autodesk Combustion для композитинга и Mudbox

для создания текстур и цифровой скульптуры в 450 кадрах.

**Лучшая операторская работа**

**"Черный лебедь" – номинант**

Тим Стипан (Tim Stipan) в студии Technicolor New York использовал при создании этого фильма технологию Lustre для цветокоррекции, а специалисты студии LOOK Effects с помощью Maya создали 210 кадров с визуальными эффектами, включая ошеломляющее преобразование актрисы Натали Портман в черного лебедя.

**"Железная хватка" – номинант**

Специалисты студии EFILM использовали собственное приложение Eworks на основе Lustre для выполнения цветокоррекции с использованием благородных приглушенных тонов в римейке классического вестерна братьев Кознов.