

**АНАНЬИН А. В., КУЗНЕЦОВ В. В.**

**ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЖЕНИЯ НЕСУЩИХ  
КОНСТРУКЦИЙ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Аннотация.** В статье описана технология численного моделирования нагружения несущих элементов конструкций перерабатывающего оборудования с применением балочных элементов в ANSYS. Дана оценка адекватности полученных результатов.

**Ключевые слова:** балка, конструкция, моделирование, балочные элементы, ANSYS.

**ANANYIN A. V., KUZNETSOV V. V.**

**TECHNOLOGY OF SIMULATION OF LOADING IN LOADBEARING STRUCTURES  
OF PROCESSING EQUIPMENT WITH BEAM ELEMENTS**

**Abstract.** The article describes the technology of numerical simulation of loading of the loadbearing structures of the processing equipment with the use of beam elements in ANSYS. The adequacy of the results obtained is assessed.

**Keywords:** beam, construction, simulation, beam elements, ANSYS.

Несущие конструкции являются одними из наиболее важных элементов оборудования различного назначения, в том числе перерабатывающего, поэтому точная оценка их напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации определяет его надежность и безопасность.

Аналитические методы решения задач данного класса в настоящее время применяются достаточно редко, так как имеют более высокую трудоемкость и сложность по сравнению с численными методами. Последние получили широкое распространение с развитием технологий высокопроизводительных вычислений и соответствующего программного обеспечения (ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, NX CAE, ПК ЛИРА и др.). С учетом возможностей и популярности современных пакетов расчета, технологию моделирования несущих конструкций перерабатывающего оборудования целесообразно рассмотреть на примере расчета балочной несущей конструкции [1, с. 31] в системе конечно-элементного анализа ANSYS Mechanical APDL (MAPDL).

Расчетная схема нагружения рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 1а. В ее рамках рассматривается нагружение двутавра немерной длины горячекатаного профиля 30Б2, выполненного из стали С345 категории 5 по ударной вязкости по ГОСТ 27772-2015 [2]: Двутавр НД – 30Б2 – ГК ГОСТ Р 57837-2017 /С345Б – 5 ГОСТ 27772-2015.

Параметры сечения двутавра приведены в таблице 1, а физико-механические

характеристики материала, из которого он выполнен – в таблице 2.

В процессе нагружения двутавр опирается на две опоры, одна из которых неподвижная, а вторая – шарнирно-подвижная, допускающая перемещение двутавра вдоль его оси. К свободным концам двутавра приложена равномерно распределенная нагрузка  $w = 4000 \text{ Н/м}$ .

Оценку напряженно-деформированного состояния несущей конструкции целесообразно выполнить на основе оценки максимальных изгибающих напряжений  $\sigma$  в средней части сечения балки и прогиба  $\delta$  в ее центре.

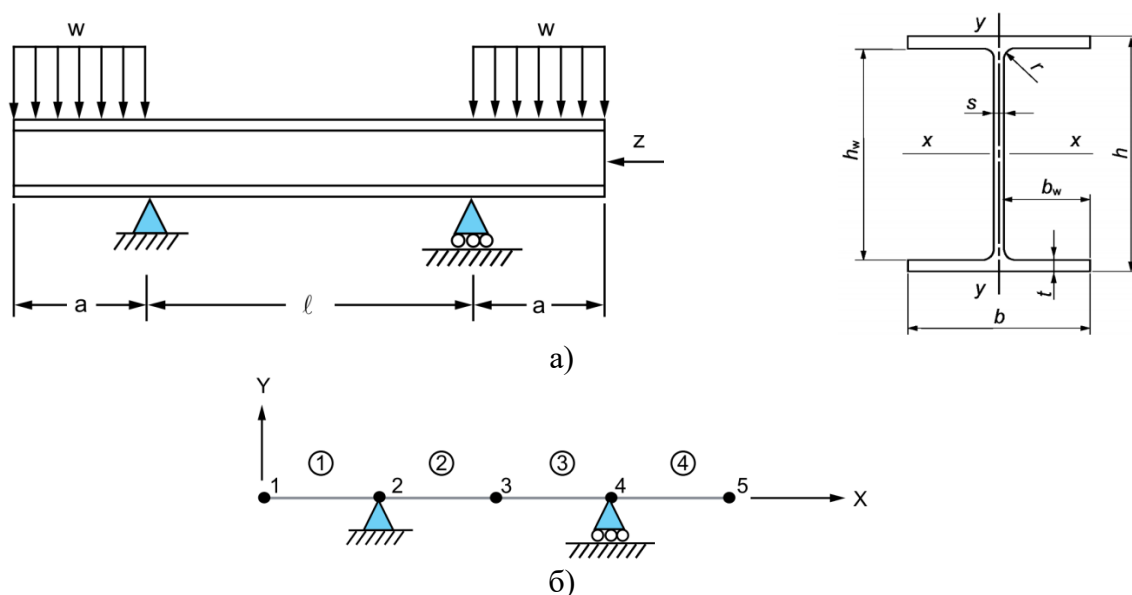


Рис. 1. Расчетная схема (а) и конечно-элементная сетка (б) конструкции.

Таблица 1

### Геометрические характеристики двутавра

| Номер профиля | Номинальные размеры, мм |     |     |     |       |       |     | Номинальная площадь поперечного сечения $F_H$ , $\text{см}^2$ | Номинальная масса 1 м, кг | Справочные величины для осей профиля |                       |                       |            |                       |                       |                       |            |
|---------------|-------------------------|-----|-----|-----|-------|-------|-----|---|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
|               | $h$                     | $b$ | $s$ | $t$ | $h_w$ | $b_w$ | $r$ |   |                           | $I_x$ , $\text{см}^4$                | $W_x$ , $\text{см}^3$ | $S_x$ , $\text{см}^3$ | $i_x$ , мм | $I_y$ , $\text{см}^4$ | $W_y$ , $\text{см}^3$ | $S_y$ , $\text{см}^3$ | $i_y$ , мм |
| 30Б2          | 300                     | 150 | 6,5 | 9,0 | 282   | 71,8  | 13  | 46,78   | 36,7                      | 7209,3                               | 480,6                 | 271,1                 | 124,1      | 507,5                 | 67,7                  | 52,6                  | 32,9       |

Таблица 2

### Основные физико-механические характеристики материала двутавра

| Класс прочности | Толщина полки $t$ , мм | Модуль Юнга $E$ , Па | Предел текучести $\sigma_T$ , МПа | Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа | Относительное удлинение $\delta_5$ , % |
|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|--|--|
| С345Б           | 9,0                    | $2,1 \cdot 10^{11}$  | 345                               | 480                                      | 21                                     |

Моделирование нагружения балочных конструкций осуществляется с использованием графического интерфейса или командном (пакетном) режиме MAPDL в три этапа.

На первом этапе определяются свойства материалов, типы конечных элементов и их настройки, типы сечений балочных элементов и их параметры, задаются граничные (краевые) условия. Настройки параметров и запуск решения задачи осуществляется на втором этапе. На третьем этапе выводятся необходимые результаты решения. В случае, если прямое построение конечно-элементной модели имеет высокую трудоемкость, то как правило, сначала создается твердотельная модель конструкции, на которую затем наносится конечно-элементная сетка.

Для анализа балочных конструкций в MAPDL используются трехмерные линейные, квадратичные или кубические балочные элементы типа BEAM188 и BEAM189 (рисунок 2), разработанные с учетом основных положений теории балок Тимошенко [3; 4] и допускающие искривление их поперечных сечений.

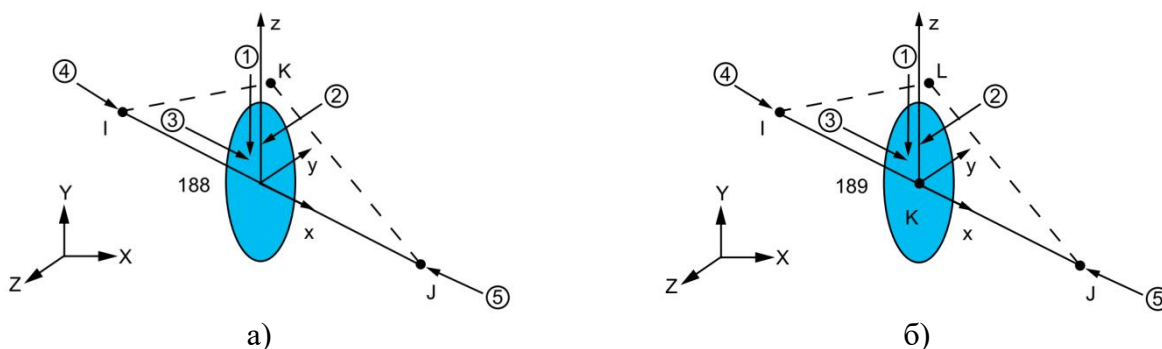


Рис. 2. Геометрия элементов BEAM188 (а) и BEAM189 (б): I, J, K – узлы, X, Y, Z – оси.

Важно отметить, что ограничения теории деформации сдвига первого порядка позволяют адекватно описывать нагружение только тонких и умеренно толстых балок. Для оценки ее применимости используется коэффициент гибкости балочной конструкции:

$$k = GAL^2 / (EI_z), \quad (1)$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $\text{Н/м}^2$ ;  $A$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;  $L$  – длина сегмента балки,  $\text{м}$ ;  $(EI)$  – изгибная жесткость,  $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ;  $E$  – модуль упругости материала,  $\text{Н/м}^2$ ;  $I_z$  – главный момент инерции поперечного сечения балки относительно оси  $Z$ ,  $\text{м}^4$ .

Сравнение деформаций  $\delta$  (таблица 3), полученных при нагружении консольнозакрепленной балки по схеме на рисунке 3, показывает, что с увеличением коэффициента гибкости адекватность результатов моделирования, полученных с использованием балочных элементов MAPDL,

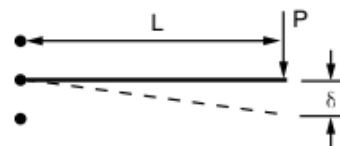


Рис. 3. Расчетная схема нагружения балки при оценке адекватности моделирования.

нелинейно возрастает [5, с. 803]. С учетом этого ANSYS Inc. рекомендует [5, с. 803] использовать балочные элементы, когда значение коэффициента гибкости не менее 30.

### Влияние гибкости балки на адекватность результатов моделирования

| № | Коэффициент гибкостик | Соотношение деформаций, полученных с применением теорий Тимошенко $\delta_{Т}$ и Эйлера-Бернулли $\delta_{ЭБ}$<br>$k_{\delta} = \delta_{Т} / \delta_{ЭБ}$ |
|---|-----------------------|---|
| 1 | 25                    | 1,120   |
| 2 | 50                    | 1,060   |
| 3 | 100                   | 1,030   |
| 4 | 1000                  | 1,003   |

Кроме шести степеней свободы (перемещений и поворотов относительно X, Y и Z-осей) каждый узел балочных элементов может иметь седьмую степень свободы – деформацию.

Элементы BEAM188 и BEAM189 поддерживают модели упругости, пластичности, ползучести и другие нелинейные модели материалов, технологии рождения и смерти элементов, начальное состояние, большие отклонения и деформации, эффекты Кориолиса, нелинейную стабилизацию, самоупрочнение и другие.

В рамках рассматриваемой задачи создана конечно-элементная сетка, состоящая из 4 элементов типа BEAM188 и 5 узлов, как показано на рисунке 1б. Она построена таким образом, что в местах закрепления балки созданы узлы 2 и 4, к которым применены соответствующие ограничения степеней свободы. Равномерно распределенная нагрузка  $w = 4000$  кН/м приложена к балочным элементам 1 и 4.

Тип сечения балок задается MAPDL-командой [6, с. 1453–1458]

*SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY*

где *SECID* – идентификатор сечения; *Type* – тип сечения (для балок *Type = BEAM*); *Subtype* – тип формы сечения (рисунок 4); *Name* – имя сечения (не более 8 символов); *REFINEKEY* – уровень детализации сетки (0 – минимальная, 5 – максимальная).

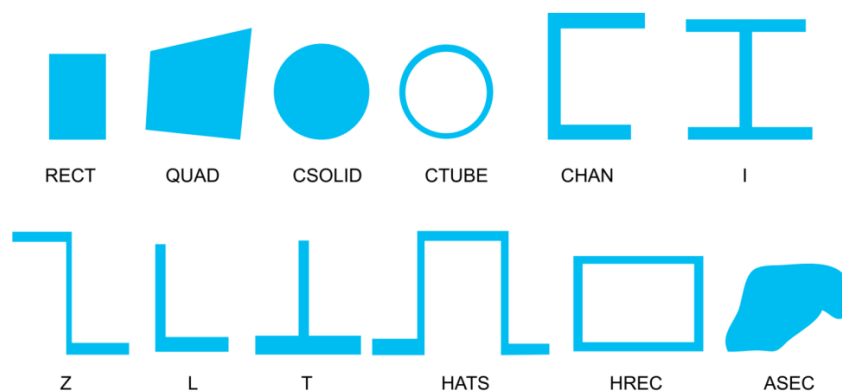


Рис. 4. Типы форм сечений балочных элементов MAPDL.

Применительно к рассматриваемой задаче в параметрах команды *SECTYPE* необходимо указать тип формы сечения (двутавр), задав *Subtype = 1*.

В общем виде параметры формы сечения балки задаются командой

*SECDATA,VAL1, ... VAL12,*

где *VAL1 ... VAL12* – значения параметров формы сечения [6, с. 1417-1439].

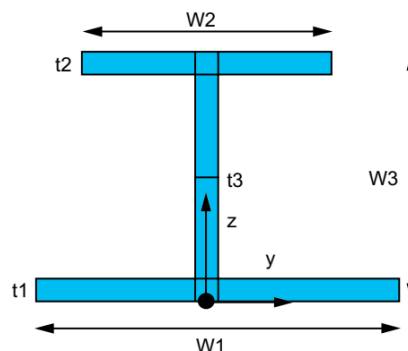


Рис. 5. Параметры двутавра.

Применительно к сечению двутавра команда *SECDATA* должна быть записана в виде:

*SECDATA,W1, W2, W3, t1, t2, t3,*

где *W1, W2, W3, t1, t2* и *t3* – параметры двутавра (рисунок 5).

Ориентация *Z* и *Y*-осей сечения балочных элементов (рисунок 5) в MAPDL определяется положением узла *K* для элементов типа BEAM188 и узла *L* для BEAM189 (рисунок 2).

Ниже приведена последовательность команд для решения рассматриваемой задачи.

```

/PREP7                ! Вход в препроцессор PREP7
ANTYPE,STATIC        ! Тип анализа: статический
! Задание свойств материала № 1
MP,PRXY,,0.3         ! Коэффициент Пуассона
MP,EX,1,2.1e11       ! Модуль Юнга Ex = 2.1e11 Па
! Выбор типа конечного элемента и его настройка
ET,1,BEAM188         ! Тип элемента – BEAM188
KEYOPT,1,9,3         ! Вывод данных: в 9 промежуточных точках
KEYOPT,1,3,3         ! Форма функции элемента вдоль оси: кубическая
! Выбор типа сечения и настройка его параметров
Ih = 0.300           ! h = 0.3 м
Ib = 0.150           ! b = 0.15 м
It = 0.009           ! t = 0.009 м
Is = 0.0065         ! s = 0.0065 м
SECT,1,BEAM,I        ! Форма сечения №1: двутавр
SECDATA,Ib,Ib,Ih,It,Is ! Задание размеров сечения швеллера
! Построение конечно-элементной сетки
N,1                  ! Создание узла № 1 с координатами (0;0;0)
N,5,4                ! Создание узла № 5 с координатами (4;0;0)
N,6,0.5,0.1         ! Создание узла ориентации № 6 с координатами (0.5;0.1;0)
N,10,3.5,0.1        ! Создание узла ориентации № 10 с координатами (3.5;0.1;0)
FILL,1,5             ! Генерирование узлов №№ 2-4 между узлами № 1 и № 5
FILL,6,10            ! Генерирование узлов ориентации между узлами № 6 и № 10
E,1,2,6              ! Создание элемента № 1 с узлами №№ 1, 2 и 6
EGEN,4,1,1          ! Генерирование элементов №№ 2-4 по элементу-шаблону № 1
! Задание граничных условий
D,2,UX,,,,UY        ! Запрет X, Y-перемещений в узле № 2
D,4,UY              ! Запрет Y-перемещений в узле № 4
NSEL,S,LOC,Y,0      ! Выбор узлов с Y = 0
D,ALL,UZ            ! Запрет Z-перемещений в выбранных узлах
D,ALL,ROTX          ! Запрет поворотов относительно оси X в выбранных узлах
D,ALL,ROTY          ! Запрет поворотов относительно оси Y в выбранных узлах
NALL                ! Выбор всех узлов

```

```

Pw = 4000          ! Нагрузка w = 4000 Н/м
SFBEAM,1,1,PRES,Pw  ! Приложение нагрузки w к элементу 1
SFBEAM,4,1,PRES,Pw  ! Приложение нагрузки w к элементу 4
FINISH            ! Выход из препроцессора PREP7
! Настройка и запуск решения
/SOLU              ! Вход в процессор настройки решения Solution
OUTPR,BASIC,1     ! Вывод результатов: основные величины, для каждого подшага
/OUT,SCRATCH
SOLVE              ! Запуск решения
FINISH            ! Выход из процессора SOLUTION
! Вывод результатов решения
/POST1             ! Вход в постпроцессор POST1
SET,1,1           ! Выбор результатов 1 подшага 1 шага решения
*GET,DISP,NODE,3,U,Y  ! Вывод Y-перемещений в узле № 3
ETABLE,STRS,LS,1   ! Формирование таблицы напряжений в элементах
*GET,STRSS,ELEM,2,ETAB,STRS  ! Вывод напряжения в элементе № 2
FINISH            ! Выход из постпроцессора POST1

```

Расчетная схема рассматриваемой задачи приведена на рисунке 6.

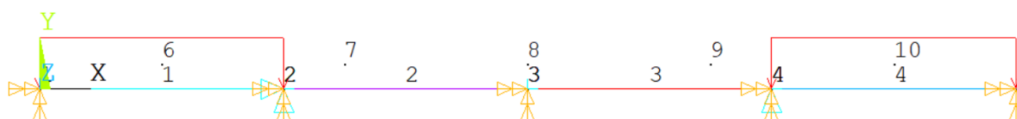


Рис. 6. Расчетная схема конструкции в MAPDL.

На рисунке 7 представлены исходное и деформированное состояния рассматриваемой балочной конструкции. Анализ полученных результатов решения показывает, что при заданной нагрузке максимальный прогиб в центральной части балки  $\delta = 0,684$  мм, а максимальное вертикальное перемещение ( $U_Y = 0,185$  мм) наблюдалось на ее свободных концах. Максимальное напряжение в средней части сечения балки составило  $\sigma = 3,894$  МПа, что значительно ниже соответствующих предельно допустимых значений.

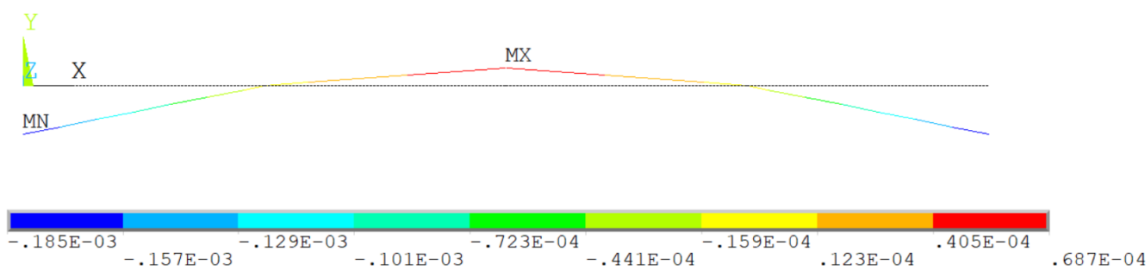


Рис. 7. Y-перемещения элементов конструкции.

Сравнение результатов аналитического расчета [7] и моделирования в MAPDL [1, с. 31], показывает, что погрешность не превышает 0,3%, поэтому балочные элементы типа BEAM188 могут эффективно использоваться для решения задач данного класса.

Настоящая работа является продолжением цикла работ [8–16], посвященных повышению эффективности применения современных технологий численного моделирования при разработке надежных и безопасных конструкций машин и оборудования АПК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSYS Mechanical APDL Verification Manual. – ANSYS, Inc., 2020. – 3258 p.
2. ГОСТР 57837-2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок.
3. Timoshenko S. P. On the correction factor for shear of the differential equation for transverse vibrations of bars of uniform cross-section // *Philosophical Magazine*. – 1921. – P. 744.
4. Timoshenko S. P. On the transverse vibrations of bars of uniform cross-section // *Philosophical Magazine*. – 1922. – P. 125.
5. ANSYS Element Reference. – ANSYS, Inc., 2020. – 1354 p.
6. ANSYS Command Reference. – ANSYS, Inc., 2020. – 1354 p.
7. Timoshenko S. P. *Strength of Material. Part I. Elementary Theory and Problems*. – 3rd Edition. – NY: D. Van Nostrand Co., Inc., 1955. – P. 98.
8. Кузнецов В. В. Гиперупругие модели полимерных материалов // *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф.* – Саранск: 2016. – С. 275–281.
9. Кузнецов В. В., Водяков В. Н., Кузнецова О. М., Волгапова О. А. Технология «рождения» и «смерти» конечных элементов ANSYS Inc. (США) // *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр.* – Саранск, 2013. – С. 392–401.
10. Кузнецов В. В., Стеблов А. А., Стеблов В. А. Вывод и обработка результатов теплового анализа в современных системах конечно-элементного анализа // *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф.* – Саранск, 2019. – С. 431–439.
11. Кузнецов В. В., Тимошенко В. А. Механизм решения тепловых задач в современных системах конечно-элементного анализа // *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф.* – Саранск, 2019. – С. 500–512.
12. Мурина Т. А., Кузнецов В. В., Водяков В. Н. Определение параметров гиперупругих моделей материалов в пакете ANSYS // *Энергоэффективные и*

- ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Саранск, 2016. – С. 450–457.
13. Кузнецов В. В. Механизмы моделирования контактного взаимодействия элементов трибосопряжений // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: Межвуз. сб. науч. тр. / МГУ им. Н.П. Огарева. – Саранск, 2018. – С. 262–270.
  14. Ананьин А. В., Кузнецов В. В. Тепловой анализ соединения теплообменника // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Саранск, 2022. – С. 382–390.
  15. Кузнецов В. В. Использование функций независимых переменных при приложении граничных условий в моделях ANSYS // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Саранск, 2019. – С. 521–532.
  16. Кузнецов В. В. Модели трения и изнашивания в ANSYS // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Саранск, 2018. – С. 271–281.