

Б
С

БИБЛИОТЕКА СТРОИТЕЛЯ

7

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Том 7

И.В. Богомаз
Т.П. Мартынова
В.В. Москвичев



«БИБЛИОТЕКА СТРОИТЕЛЯ»

И.В. Богомаз, Т.П. Мартынова,
В.В. Москвичев

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Том 7

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ
по образованию в области строительства в качестве
учебного пособия для студентов, обучающихся
по направлению 653500 «Строительство»*

2-е издание, исправленное и дополненное



Издательство Ассоциации строительных вузов

МОСКВА

2011

УДК 531
ББК 22.21
Б 74

Рецензенты:

заведующий кафедрой «Сопrotивление материалов и теоретическая механика» Красноярского государственного аграрного университета, ведущий научный сотрудник Института вычислительного Моделирования СО РАН, д.ф.-м.н., профессор *И.О. Богульский*; заслуженный энергетик РФ, лауреат Совета Министров СССР, д.т.н., профессор *А.П. Епифанов*; ведущий научный сотрудник отдела машиноведения Института вычислительного моделирования СО РАН, д.т.н., профессор *А.М. Лепихин*.

Богомаз И.В., Мартынова Т.П., Москвичев В.В.

Сопrotивление материалов. Том 7. Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 192 с.

ISBN 978-5-93093-831-9

Материал учебного пособия представлен в соответствии с государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по подготовке дипломированного специалиста по направлению 653500 «Строительство». Рассмотрены теоретические основы и методика расчетов на прочность и жесткость элементов строительных конструкций при сложном сопротивлении бруса, изложен энергетический метод определения перемещений упругих систем, а также метод Мора. Обстоятельно изложены расчеты статически неопределимых систем, основы расчета на прочность стержневых систем с учетом развития пластических деформаций, устойчивость сжатых стержней, динамическое действие нагрузок, прочность материалов при переменных напряжениях, а также расчеты на прочность при наличии дефектов.

Пособие адресовано студентам строительных специальностей дневной и заочной форм обучения.

ISBN 978-5-93093-831-9

© Издательство АСВ, 2011 г.

© Богомаз И.В., Мартынова Т.П.,
Москвичев В.В., 2011 г.

ГЛАВА 1. СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ БРУСА

1.1. Основные понятия

В главах первой части были рассмотрены простейшие виды нагружения бруса: осевое растяжение и сжатие, сдвиг, кручение и прямой изгиб. В реальных условиях элементы конструкций часто подвергаются воздействию *различных комбинаций простых нагружений*. Такие случаи называют *сложным сопротивлением*.

Под *сложным сопротивлением* бруса деформированию понимают такие сочетания простых нагружений, когда в его сечениях *одновременно возникают несколько внутренних силовых факторов*.

В основе расчетов на сложное сопротивление лежит *принцип независимости действия сил*, согласно которому напряжения и деформации, вызванные комбинацией силовых факторов, определяются как сумма (алгебраическая или геометрическая) напряжений и деформаций от каждого фактора в отдельности. Данный принцип применим во всех случаях, когда рассматриваются малые деформации в пределах справедливости закона Гука.

Рассмотрим основные виды сложного сопротивления: *косой изгиб, внецентренное сжатие (растяжение), изгиб с кручением*.

1.2. Косой изгиб

1.2.1. Плоский и пространственный косой изгиб

В случае *прямого изгиба* силовая плоскость совпадает с одной из главных плоскостей инерции, например, yOz (рис. 1.1, а). При этом силовая линия (с.л.) и нейтральная линия (н.л.) взаимно перпендикулярны, а изогнутая ось балки лежит в силовой плоскости.

Нормальные напряжения в случае прямого изгиба вычисляются по формулам

$$\sigma = \frac{M_x}{J_x} y \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{M_x}{W_x}. \quad (1.1)$$

Косой изгиб – вид нагружения бруса, при котором плоскость действия изгибающего момента не совпадает ни с одной из главных плоскостей сечения. При этом изогнутая ось балки – плоская кривая, не совпадающая с силовой плоскостью.

Если косой изгиб вызван нагрузками, действующими в одной плоскости (силовой), то изгиб называют *плоским* (рис. 1.1, б). Если нагрузки действуют в разных продольных плоскостях, то это *сложный* или *пространственный изгиб* (рис. 1.1, в). Изогнутая ось балки – не плоская кривая.

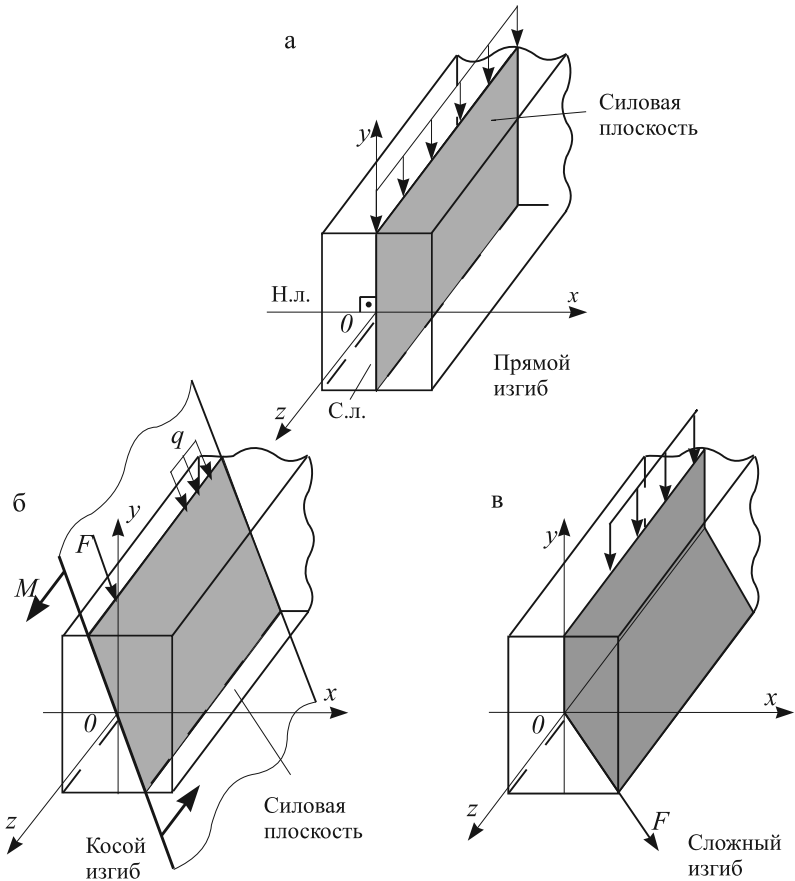


Рис. 1.1

Плоский и сложный косой изгиб рассматривают как совокупность двух прямых изгибов, для чего нагрузки, лежащие в продольных плоскостях, раскладывают на составляющие, расположенные в главных плоскостях xOz и yOz . В поперечных сечениях бруса в общем случае возникают 4 внутренних силовых фактора: Q_x, Q_y, M_x, M_y . Проводя расчет на прочность при косом изгибе, обычно пренебрегают влиянием касательных напряжений.

Примеры из инженерной практики

Брус обрешетки кровли (рис. 1.2, а) нагружен по схеме косого изгиба. Вертикальная нагрузка F от веса кровли и собственного веса обрешетки наклонена к главной оси y под некоторым углом α .

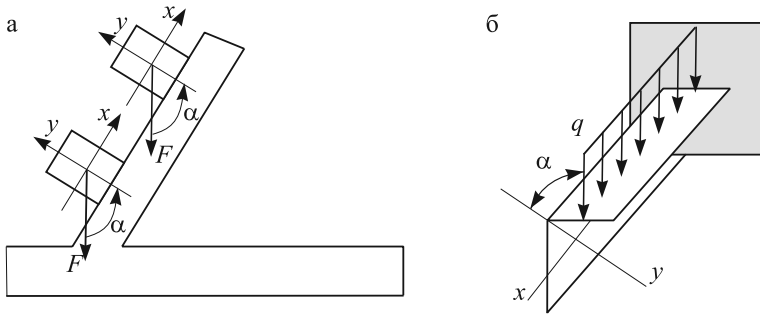


Рис. 1.2

Уголок, заделанный одним концом в стену (рис. 1.2, б), также нагружен по схеме косоугольного изгиба, т. к. главные оси сечения – x и y – наклонены под некоторым углом α к погонной нагрузке q (это вес 1-го метра уголка).

Подкрановая балка мостового крана (рис. 1.3, а) при торможении тележки с грузом испытывает косоугольный изгиб вследствие отклонения груза G от вертикали на угол α (рис. 1.3, б).

1.2.2. Нормальные напряжения при косоугольном изгибе

Рассмотрим консольный брус, нагруженный силой F , направленной под углом α к главной оси Oy (рис. 1.4, а).

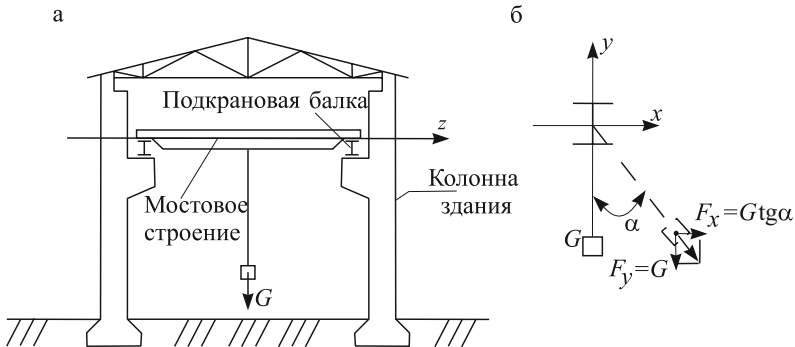


Рис. 1.3

Разложим эту силу на составляющие F_x и F_y по главным осям поперечного сечения:

$$F_x = F \sin \alpha; \quad F_y = F \cos \alpha.$$

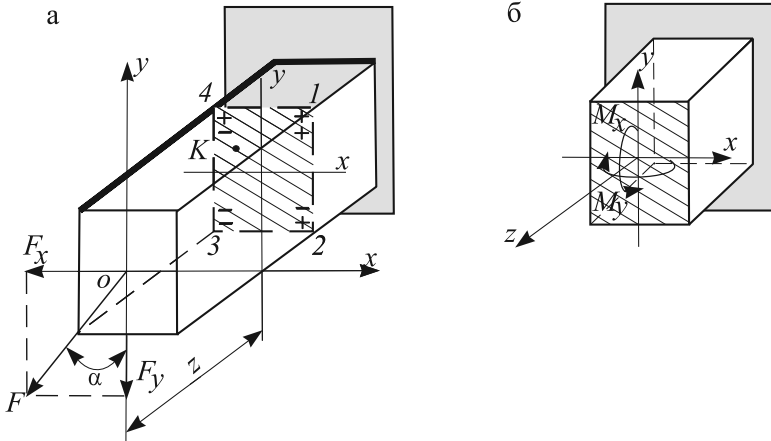


Рис. 1.4

Каждая из этих составляющих вызывает прямой изгиб бруса: F_y – в плоскости zOy , F_x – в плоскости zOx . Изгибающие моменты в произвольном сечении бруса (рис. 1.4, б) находятся так:

$$\begin{aligned} M_x &= F_y z = F z \cos \alpha = M \cos \alpha; \\ M_y &= F_x z = F z \sin \alpha = M \sin \alpha, \end{aligned} \quad (a)$$

где $M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$ – полный изгибающий момент в плоскости действия силы F .

Нормальные напряжения в сечении согласно принципу независимости действия сил определяются как сумма

$$\sigma = \sigma_{M_x} + \sigma_{M_y}.$$

С учетом (1.1)

$$\sigma = \frac{M_x}{J_x} y + \frac{M_y}{J_y} x. \quad (1.2)$$

По формуле (1.2) определяются *нормальные напряжения в любой точке* сечения при косом изгибе. Причем моменты M_x и M_y , а также координаты x и y исследуемой точки подставляют *по абсолютному значению*, а знаки слагаемых напряжений устанавливают исходя из характера *деформирования* бруса.

Так, F_y вызывает изгиб, при котором верхние волокна растянуты, нижние – сжаты, а действие F_x вызывает растяжение волокон правой части и сжатие левой части сечения. Соответствующие знаки напряжений σ_{M_x} и σ_{M_y} проставлены в координатных четвертях сечения (рис. 1.4, а). Например, для точки K первое слагаемое в формуле (1.2) следует взять со знаком (+), а второе – со знаком (-).

В угловых точках сечения модули координат x и y имеют наибольшие значения, поэтому в них возникают максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y}. \quad (1.3)$$

Наибольшее растягивающее напряжение будет в точке 1, наибольшее сжимающее – в точке 3 (рис. 1.4, а), т. к. слагаемые в формуле (1.3) для этих точек имеют одинаковые знаки.

Преобразуем формулу (1.3):

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{1}{W_x} \left(M_x + M_y \frac{W_x}{W_y} \right) = \frac{M_{np}}{W_x},$$

где M_{np} – приведенный момент:

$$M_{np} = M_x + M_y \frac{W_x}{W_y} \quad (1.4)$$

1.2.3. Нейтральная линия при косом изгибе

Нейтральная линия является геометрическим местом точек сечения, в которых нормальные напряжения равны нулю.

Пусть текущие координаты одной из точек нейтральной линии (н.л.) будут x_0 и y_0 . Тогда, применяя формулу (1.2), получим уравнение нейтральной линии:

$$\sigma = \frac{M_x}{J_x} y_0 + \frac{M_y}{J_y} x_0 = 0.$$

Откуда

$$-\frac{y_0}{x_0} = \frac{J_x M_y}{J_y M_x}. \quad (1.5)$$

Данное уравнение является уравнением прямой, проходящей *через начало координат*. Равенство (1.5) удовлетворяется тогда, когда знаки x_0 и y_0 различны. Следовательно, нейтральная линия пройдет через II и IV четверти (рис. 1.5, а).

Обозначим через β угол наклона нейтральной линии к оси Ox ; учитывая, что x_0 и y_0 имеют разные знаки (рис. 1.5, а), имеем

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{y_0}{x_0}.$$

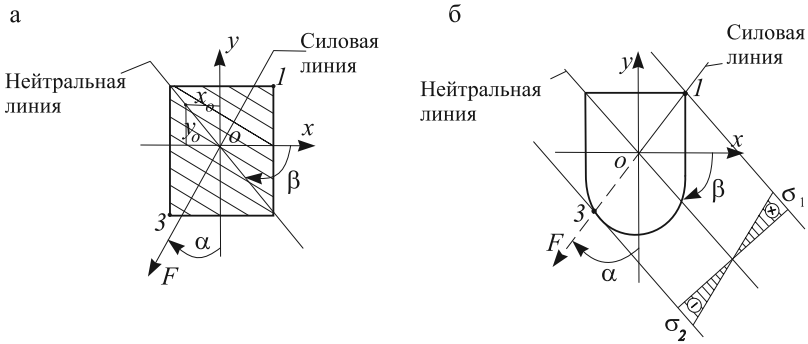


Рис. 1.5

С учетом этого перепишем выражение (1.5):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{J_x}{J_y} \frac{M_y}{M_x}. \quad (1.6)$$

Подставив в формулу (1.6) значения моментов из равенств (а), получим *формулу для угла наклона нейтральной линии к оси Ox* :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha. \quad (1.7)$$

Анализ формулы (1.7) позволяет сделать следующие выводы.

1. Если $J_x \neq J_y$, то $\beta \neq \alpha$, следовательно, в отличие от прямого изгиба нейтральная линия при косом изгибе *не перпендикулярна силовой линии*.

Для сечений, у которых все центральные оси являются главными и моменты инерции равны $J_x = J_y$ (круг, квадрат, правильный многоугольник и т. п.), изгиб всегда будет прямой. Расчет ведется по полному моменту

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}.$$

2. Силовая и нейтральная линии при косом изгибе проходят через разные четверти сечения (рис. 1.5).

3. Углы α и β отсчитываются в одном направлении от осей Oy и Ox (в данном примере – по ходу часовой стрелки).

1.2.4. Расчеты на прочность при косом изгибе

Для расчета на прочность необходимо определить опасное сечение, а в нем – опасную точку, для которой записывается условие прочности.

Определение опасного сечения

При плоском косом изгибе (рис. 1.1, а) строят эпюру полного изгибающего момента M . По максимальному значению момента определяется положение опасного сечения. Для бруса (рис. 1.4, а, б) положение опасного сечения очевидно без построения эпюры (в заделке $M_{\max} = F \ell$, где ℓ – длина балки).

В случае пространственного изгиба эпюры моментов строят в двух главных плоскостях (рис. 1.6). Обычно сечения с наибольшими значениями M_x и M_y не совпадают. Поэтому по формуле (1.4) вычисляют приведенный момент M_{np} для нескольких наиболее опасных сечений. Например, для сечения D : $M_{np}^D = M_x^D + M_y^D \frac{W_x}{W_y}$. Опасным будет то сечение, где M_{np} имеет наибольшее значение.

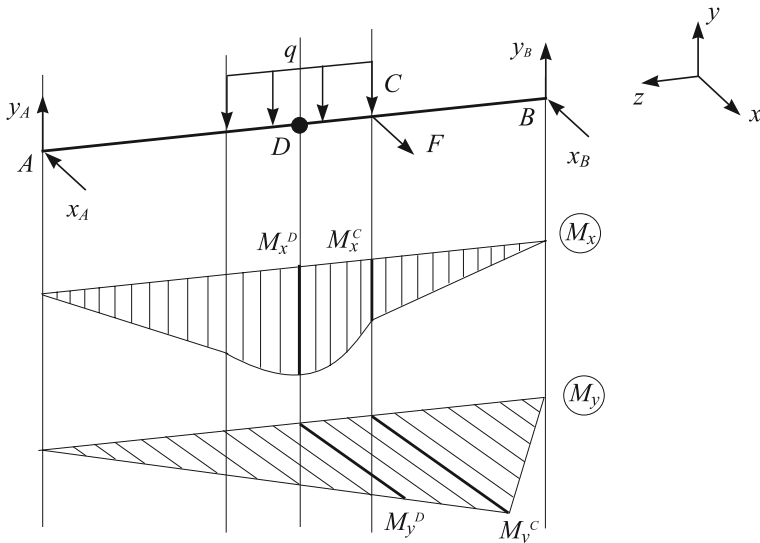


Рис. 1.6

Нахождение опасных точек

Для сечения произвольной формы определяют положение нейтральной линии по формуле (1.7). Затем проводят касательные к контуру сечения, параллельные нейтральной линии (рис. 1.5, б). Опасными являются точки 1 и 3, наиболее удаленные от нейтральной линии.

Для бруса из хрупких материалов, имеющих различное сопротивление растяжению и сжатию, составляют два условия прочности.

По допускаемым напряжениям:

$$\begin{aligned}\sigma_{p \max} &= \frac{M_x}{J_x} y_1 + \frac{M_y}{J_y} x_1 \leq [\sigma_p]; \\ |\sigma_{c \max}| &= \left| \frac{M_x}{J_x} y_3 + \frac{M_y}{J_y} x_3 \right| \leq [\sigma_c],\end{aligned}\tag{1.8}$$

где $[\sigma_p]$, $[\sigma_c]$ – допускаемые напряжения на растяжение и сжатие.

По предельным состояниям:

$$\begin{aligned}\sigma_{t \text{ расч}} &= \frac{M_x}{J_x} y_1 + \frac{M_y}{J_y} x_1 \leq R_t \gamma_c; \\ |\sigma_{c \text{ расч}}| &= \left| \frac{M_x}{J_x} y_3 + \frac{M_y}{J_y} x_3 \right| \leq R_c \gamma_c,\end{aligned}\tag{1.9}$$

где M_x и M_y – расчетные изгибающие моменты в опасном сечении; R_t и R_c – расчетные сопротивления материала на растяжение и сжатие (согласно СНиП II-23-81* имеют обозначения $R_{ит}$ и $R_{ис}$ и устанавливаются по пределу прочности материала); γ_c – коэффициент условий работы.

При расчете бруса из пластичного материала ($R_t = R_c = R$) используется одно из условий (1.8) и (1.9), которое соответствует большему по абсолютному значению напряжению.

Для сечений с двумя осями симметрии и с выступающими углами (прямоугольник, двутавр, коробчатое сечение и т. п.) опасными будут угловые точки (рис. 1.5, а). Условия прочности согласно (1.3) запишутся в виде

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq [\sigma]; \\ \sigma_{\text{расч}} &= \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq R \cdot \gamma_c,\end{aligned}\tag{1.10}$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение; R – расчетное сопротивление материала растяжению и сжатию при изгибе (устанавливается согласно СНиП II-23-81* по величине предела текучести и имеет обозначение R_y).

Для *хрупкого* материала опасной будет точка 1 (рис. 1.5, а), в которой возникает напряжение растяжения.

Расчеты на прочность

Проверочный расчет проводится по формулам (1.8)-(1.10).

Допускаемое значение нагрузки при известных размерах поперечного сечения находят из условий прочности (1.8)-(1.10).

Проектный расчет (подбор поперечного сечения) осуществить сложнее, т. к. в формулы входят две неизвестные характеристики J_x и J_y или W_x и W_y . В общем случае задаются размерами сечения и осуществляют проверку условий прочности. Если условие (1.9) или (1.10) не удовлетворяется, то размеры корректируют и проверяют снова.

Для *простых* сечений (прямоугольник, двутавр), задавшись отношением $n = \frac{W_x}{W_y}$, пользуются формулой

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{W_x} (M_x + n M_y) \leq R\gamma_c, \quad (1.11)$$

откуда с учетом (1.4) находят расчетное значение момента сопротивления

$$W_x \geq \frac{M_x + n M_y}{R\gamma_c} = \frac{M_{np}}{R\gamma_c}. \quad (1.12)$$

Для прямоугольного сечения $n = \frac{h}{b}$, где h и b – высота и ширина сечения. Для прокатных двутавров $n = 6-14$ (см. сортамент).

По найденному моменту сопротивления W_x с использованием сортамента выбирают номер профиля и осуществляют проверку прочности по формуле (1.10).

1.2.5. Прогибы при косом изгибе

Полный прогиб сечения (рис. 1.7) на основе принципа независимости действия сил находят как геометрическую сумму прогибов в направлении главных осей по формуле

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (1.13)$$

Прогибы f_x и f_y в направлении главных осей прямо пропорциональны составляющим $F_x = F \cdot \sin \alpha$ и $F_y = F \cdot \cos \alpha$ и обратно пропорциональны жесткости при изгибе:

$$f_x = K \frac{F_x}{EJ_y}; \quad f_y = K \frac{F_y}{EJ_x},$$

где K – коэффициент, зависящий от размеров балки и положения нагрузки (его значение находится из универсального уравнения метода начальных параметров).

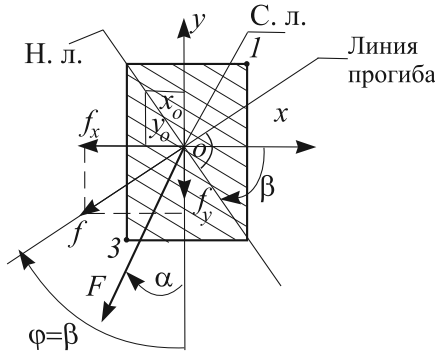


Рис. 1.7

Обозначим через φ угол отклонения полного прогиба от главной оси Oy (рис. 1.7). Тогда

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{f_x}{f_y} = \frac{KF \sin \alpha}{EJ_y} : \frac{KF \cos \alpha}{EJ_x}.$$

Окончательно с учетом (1.6) имеем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta, \quad (1.14)$$

то есть $\varphi = \beta$, следовательно:

1) направление полного прогиба f перпендикулярно нейтральной линии и не совпадает с силовой линией (рис. 1.7);

2) линия полного прогиба f отклоняется от силовой в сторону плоскости наименьшей жесткости. Чем больше разница между моментами инерции J_x и J_y , тем больше отклонение.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ БРУСА	3
1.1. Основные понятия.....	3
1.2. Косой изгиб.....	3
1.2.1. Плоский и пространственный косой изгиб	3
1.2.2. Нормальные напряжения при косом изгибе.....	5
1.2.3. Нейтральная линия при косом изгибе.....	7
1.2.4. Расчеты на прочность при косом изгибе	9
1.2.5. Прогибы при косом изгибе	11
1.3. Внецентренное сжатие бруса	14
1.3.1. Основные понятия и допущения	14
1.3.2. Нормальные напряжения при внецентренном сжатии	15
1.3.3. Нейтральная линия при внецентренном сжатии.....	17
1.3.4. Ядро сечения	19
1.3.5. Порядок расчета на прочность при внецентренном сжатии. Условие прочности	20
1.4. Изгиб с кручением	21
1.4.1. Основные понятия	21
1.4.2. Определение опасного сечения вала.....	22
1.4.3. Нахождение опасных точек в сечении и определение напряжений	23
1.4.4. Расчеты на прочность при изгибе с кручением.....	24
1.4.5. Общий случай действия сил на брус круглого сечения	26
1.4.6. Построение эпюр внутренних усилий для пространственного бруса	26
ГЛАВА 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УПРУГИХ СИСТЕМ. МЕТОД МОРА	31
2.1. Основные понятия.....	31
2.1.1. Потенциальная энергия упругой деформации	31
2.1.2. Обобщенные силы и обобщенные перемещения.....	32
2.2. Работа сил на действительных перемещениях	33
2.2.1. Работа внешних сил.....	33
2.2.2. Работа внутренних сил на действительных перемещениях.....	33
2.3. Работа сил на возможных перемещениях	35

2.3.1. Возможная работа внешних сил	35
2.3.2. Возможная работа внутренних сил	36
2.3.3. Принцип возможных перемещений	38
2.4. Теоремы о взаимности работ и перемещений (теоремы Бетти и Максвелла)	38
2.5. Формула Мора для вычисления перемещений.....	40
2.5.1. Порядок определения перемещений по методу Мора.....	41
2.5.2. Способ Верещагина	43
2.5.3. Применение способа Верещагина для вычисления перемещений	45
2.5.4. Формулы для перемножения эпюр.....	46

ГЛАВА 3. СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ СИСТЕМЫ

3.1. Классификация стержневых систем. Степень статической неопределимости	52
3.2. Метод сил.....	55
3.2.1. Основная и эквивалентная системы метода сил	56
3.2.2. Канонические уравнения метода сил	57
3.2.3. Порядок расчета статически неопределимых систем по методу сил.....	60
3.2.4. Вычисление перемещений в статически неопределимой системе.....	66
3.2.5. Использование симметрии	66
3.3. Многопролетные неразрезные балки	70
3.4. Раскрытие статической неопределимости в шарнирно-стержневых системах	74
3.5. Расчет статически неопределимых систем при температурном воздействии	76
3.6. Влияние неточности изготовления элементов конструкций на усилия в них	79
3.7. Особенности статически неопределимых систем	81

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ..

4.1. Расчет на прочность в пределах упругих деформаций.....	82
4.2. Особенности расчета на прочность за пределом упругости	83

4.2.1. Основные принципы расчетов за пределом упругости	83
4.2.2. Расчет по предельным нагрузкам. Метод предельного равновесия	84
4.3. Расчет предельной нагрузки в стержневых системах, «работающих» на осевую нагрузку	85
4.3.1. Статически определимые системы.....	85
4.3.2. Статически неопределимые системы.....	85
4.4. Расчет статически определимой балки с учетом развития пластических деформаций	89
4.4.1. Три стадии работы балки. Пластический шарнир	89
4.4.2. Расчет пластического предельного момента.....	90
4.4.3. Положение нейтральной линии при образовании пластического шарнира	92
4.4.4. Определение длины пластической зоны, примыкающей к пластическому шарниру	93
4.4.5. Расчет по ограниченной пластической деформации ..	94
4.5. Расчет статически неопределимой балки с учетом развития пластических деформаций	95
4.6. Остаточные напряжения.....	97
ГЛАВА 5. УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ.....	101
5.1. Понятие об устойчивости	101
5.1.1. Три вида равновесия тел. Критическая сила	101
5.1.2. Продольный изгиб. Потеря устойчивости	102
5.2. Продольный изгиб стержня в пределах упругих деформаций.....	104
5.2.1. Формула Эйлера для определения критической силы шарнирно закрепленного стержня	104
5.2.2. Влияние способов закрепления стержня на величину критической силы	106
5.2.3. Критическое напряжение. Гибкость стержня. Пределы применимости формулы Эйлера	108
5.3. Продольный изгиб за пределом пропорциональности	109
5.3.1. Формула Ясинского	109
5.3.2. Условие применимости формулы Ясинского	110
5.4. Диаграмма критических напряжений.....	110
5.5. Принципы рационального проектирования сжатых стержней.....	114
5.6. Практический расчет сжатых стержней на устойчивость.....	116

ГЛАВА 6. ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ НАГРУЗОК.....	121
6.1. Понятие о динамическом нагружении	121
6.1.1. Статические и динамические нагрузки.....	121
6.1.2. Динамический расчет	121
6.2. Учет сил инерции. Динамический коэффициент	122
6.2.1. Осевая инерционная нагрузка.....	122
6.2.2. Поперечная инерционная нагрузка	124
6.2.3. Расчет обода маховика	125
6.3. Ударное действие нагрузки.....	128
6.3.1. Основные понятия	128
6.3.2. Основные допущения технической теории удара	129
6.3.3. Формула для расчета динамического коэффициента	129
6.3.4. Расчеты стержней при ударном действии нагрузки ...	132
6.4. Колебания упругих систем.....	135
6.4.1. Основные понятия	135
6.4.2. Собственные колебания системы с одной степенью свободы без учета сил сопротивления	136
6.4.3. Вынужденные колебания упругой системы	140
6.4.4. График изменения коэффициента нарастания колебаний. Явление резонанса	142
6.4.5. Определение перемещений и напряжений при колебаниях системы с одной степенью свободы	143

ГЛАВА 7. ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ	
 ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ	149
7.1. Повторно-переменные нагрузки	149
7.1.1. Понятие об усталости и выносливости материалов ...	149
7.1.2. Виды циклов напряжений. Параметры цикла	150
7.2. Кривые усталости. Предел выносливости	153
7.3. Диаграмма предельных амплитуд	154
7.4. Факторы, влияющие на усталостную прочность материала	156
7.4.1. Концентрация напряжений	156
7.4.2. Масштабный фактор.....	157
7.4.3. Качество поверхности детали.....	158
7.4.4. Внешняя среда.....	159
7.5. Расчет на прочность при переменных напряжениях	160
7.6. Понятие о малоцикловой усталости.....	161

ГЛАВА 8. РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ	162
8.1. Дефектность материалов и конструкций	162
8.2. Задачи механики разрушения	163
8.3. Задача Граффитса. Концепция квазихрупкого разрушения	164
8.4. Напряжения и деформации в вершине трещины	166
8.5. Критерии разрушения тел с трещинами	169
8.6. Основные и дополнительные типы предельных состояний	169
8.7. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости.....	174
8.8. Развитие трещин при циклическом нагружении.....	178
8.9. Расчеты на трещиностойкость при статическом нагружении	181
8.10. Расчеты на трещиностойкость при циклическом нагружении	184
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	186
ОГЛАВЛЕНИЕ	187

Учебное пособие

Ирина Владимировна **Богомаз**
Тамара Петровна **Мартынова**
Владимир Викторович **Москвичев**

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Том 7

Компьютерная верстка: *Е.В. Орлов, Е.М. Лютова*
Редактор: *Ю.Р. Аделова*
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Формат 60x90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. 12 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство АСВ
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>