

УДК 539.37
DOI 10.52684/2312-3702-2021-38-4-5-11

УПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ БРУСЬЕВ ПРИ УЧЕТЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ РАССМАТРИВАЕМОЙ ТОЧКИ

С. Ю. Калашников^{1,2}, Е. В. Гурова¹

¹ *Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ), г. Волгоград, Россия;*

² *Центральный научно-исследовательский и проектный институт*

Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, г. Москва, Россия

В настоящем исследовании проведено развитие ранее предложенных теоретических методов инкрементальной модели деформирования материала. В единой постановке рассмотрен вопрос упругого деформирования стержней при изгибе, внецентренном сжатии и продольном изгибе. Предлагается использовать повышенное значение модуля упругости через градиентный коэффициент при оценке деформативности элементов. Одновременное с этим обеспечение параметров механической безопасности может привести к снижению материалоемкости. Приведенные в статье построения модели деформирования материала свидетельствуют о том, что для неидеальных продольно сжимаемых стержней за счет технологических дефектов изготовления и монтажа деформации изгиба появляются в начальный момент нагружения. Возникающая вследствие этого неоднородность напряженного состояния создает индуцированную его видом криволинейную трансверсальную анизотропию со сложно изменяющимися в пределах размеров стержня упругими характеристиками. Судить об исчерпанию запаса устойчивости стержня в этом случае следует по превышению максимальным прогибом нормируемых значений соответствующих технических регламентов.

Ключевые слова: *сжато-изогнутый стержень, деформативность, индуцированная анизотропия, градиентный коэффициент.*

ELASTIC DEFORMATION OF THE BARS TAKING INTO ACCOUNT THE TYPE OF STRESS STATE IN THE VICINITY OF THE POINT UNDER CONSIDERATION

S. Yu. Kalashnikov^{1,2}, E. V. Gurova¹

¹ *Volgograd State Technical University (VolgSTU), Volgograd, Russia;*

² *Central Research and Design Institute*

of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia

In this study, the development of the previously proposed theoretical methods of the incremental model of material deformation is carried out. In a single formulation, the question of elastic deformation of rods during bending, off-center compression and longitudinal bending is considered. It is proposed to use the increased value of the modulus of elasticity through the gradient coefficient in assessing the deformability of elements. The simultaneous provision of mechanical safety parameters can lead to a decrease in material consumption. The constructions of the material deformation model given in the article indicate that for non-ideal longitudinally compressible rods due to technological defects in manufacturing and installation, bending deformations occur from the initial moment of loading. The resulting inhomogeneity of the stress state creates a curvilinear transversal anisotropy induced by its appearance with elastic characteristics that vary complexly within the size of the rod. In this case, it is necessary to judge the exhaustion of the stability reserve of the rod by exceeding the maximum deflection of the normalized values of the relevant technical regulations.

Keywords: *compressed-curved rod, deformability, induced anisotropy, gradient coefficient.*

В работе [1] построена модель поведения упругого изотропного материала, находящегося в общем случае пространственно-неоднородного напряженно-деформированного состояния. Модель базируется на принятом положении о том, что возможно стеснение деформаций сдвига по благоприятно ориентированным площадкам при неоднородном напряженном состоянии. В качестве меры неоднородности используется вектор-градиент скалярного поля напряжений. В ряде работ [2–11] такое влияние упругодеформированных областей материала учитывалось на уровне условий пластичности, когда началу пластического течения отвечают повышенные градиентные напряжения σ_{gr} . Однако такое предельное состояние не может появиться мгновенно, оно является итогом всего процесса деформирования. В работах [1, 12] по косвенным экспериментальным данным [3, 4] показано, что при изгибе модуль упругости материала оказывается несколько больше, чем в

случае одноосного растяжения. Полагается, что в неоднородных полях напряжения модуль упругости имеет переменное значение и меняется по такому же закону, что и предельные градиентные напряжения:

$$E_{gr} = E_0 + (E_m - E_0) \frac{\frac{gradT}{T}}{\lambda_E + \frac{gradT}{T}}, \quad (1)$$

где T – интенсивность касательных напряжений, а E_m – наибольший из модулей упругости, возможный при неоднородном напряженном состоянии, который принимается равным $1,5E_0$. По направлению вектора-градиента T слои материала в окрестностях некоторой точки A «спрессованы», значит стеснение наименее сильно отразится на деформировании по площадкам, ориентированным по направлению \overline{gradT} , а наиболее сильно – по площадкам, нормальным к направлению вектора. Продоль-

ному деформированию по этим площадкам соответствует модуль упругости, имеющий некоторое повышенное значение E_{gr} . Оно является функцией модуля градиента, но не может превосходить наибольшего значения E_m . Продольному деформированию по направлению вектора-градиента соответствует минимальное значение модуля упругости E_0 , определяемое из опытов на растяжение. Соответствующие изменения претерпевают модули сдвига и коэффициенты поперечной деформации. При переходе к другой точке в пределах геометрических размеров деформированного тела изменяются величина и направление $gradT$, ориентация ортогональных площадок и комбинация модулей упругости, сдвига и коэффициентов поперечной деформации. Ось α по направлению вектора-градиента является осью упругой симметрии бесконечно высокого порядка, а нормальная к ней плоскость – плоскостью изотропии [13]. Та-

ким образом, имеет место локальная трансверсальная изотропия в точке. В целом же упругое тело, деформируемое в условиях неоднородного напряженного состояния, следует рассматривать как анизотропное.

Для любой диаграммы деформирования величина E_{gr} представляет собой касательный модуль упругости

$$E_{gr} = d\sigma/d\varepsilon,$$

откуда с учетом (1)

$$\int d\varepsilon = \int \frac{\lambda_E T + gradT}{E_0 \lambda_E + E_m gradT} d\sigma + C.$$

Например, при чистом изгибе $T = \sigma/\sqrt{3}$ (рис. 1). Полагается, как указано ранее $E_m = 1,5E_0$, что после интегрирования получим зависимость, устанавливающую взаимосвязь между напряжениями и деформациями

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \cdot \frac{\lambda_E h + 2}{\lambda_E h + 3}. \quad (2)$$

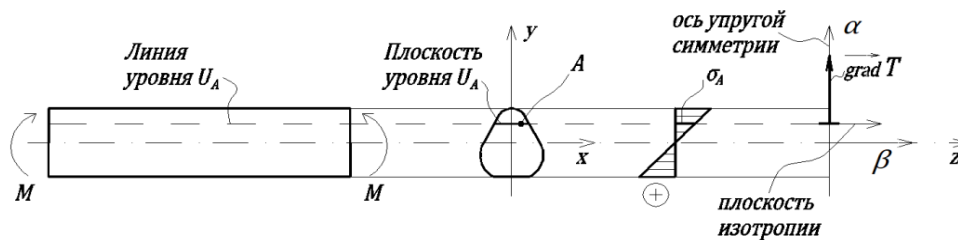


Рис. 1. Направление локальных осей при чистом изгибе призматического бруса

Из-за отсутствия прямых экспериментальных данных для определения упругой характеристики материала λ_E рекомендуется в первом приближении использовать параметр материала $\lambda_{T,g} = 20,1587 \text{ м}^{-1}$ из упомянутых критериев текучести. Тогда для любого этапа деформирования (2) приобретает вид

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \cdot \frac{20,1587h + 2}{20,1587h + 3}. \quad (3)$$

Второй множитель (3) представляет собой величину, обратно пропорциональную градиентному эффекту, и отражает уменьшение деформативности изгибаемого бруса по сравнению с ожидаемой. Назовем его градиентным коэффициентом k_{gr} . Тогда в момент перехода к пластическим деформациям

$$\varepsilon_{gr} = \frac{\sigma}{E_{gr}} = \frac{\sigma}{E_0 k_{gr}} = \frac{\sigma}{E_0} \cdot \frac{1}{k_{gr}}. \quad (4)$$

Например, для указанных ранее экспериментальных стальных балочек прямоугольного сечения высотой $h = 0,06 \text{ м}$ [14] зависимость (4) приводится к формуле

$$\varepsilon = 0,7624 \frac{\sigma}{E_0} \approx 0,76 \frac{\sigma}{E_0}. \quad (5)$$

Отметим, что еще в работе [15] указывается, что для стальных конструкций следует пользоваться диаграммой $\sigma - \varepsilon$, полученной в условиях стеснения деформаций сдвига.

Для других высот поперечного сечения зависимость (5) будет иметь иной коэффициент. Кроме зависимости (1) могут использоваться различные асимптотические зависимости как для аппроксимации модуля упругости, так и для условия пластичности [11].

Для практического использования при оценке деформативности бруса при чистом изгибе можно пользоваться формулой (4). Значение коэффициентов в ней для удобства сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Значения градиентного коэффициента деформативности $1/k_{gr}$
для различных высот поперечного сечения изгибаемого бруса

Высота сечения h , м

	<0,03	0,03≤h≤0,05	0,05≤h≤0,06	0,06≤h≤0,1	0,1≤h≤0,15	0,15≤h≤0,2	0,2≤h≤0,3	0,3≤h≤0,4	0,4≤h≤0,6
Коэффициент $1/k_{gr}$	0,73	0,75	0,76	0,79	0,82	0,83	0,87	0,89	0,91

При внецентренном сжатии бруса прямоугольного поперечного сечения (рис. 2) напряженное состояние по сравнению с предыдущим случаем усложняется

$$\sigma = \frac{F}{A} \pm \frac{M}{J} \cdot y = \frac{F}{A} \left(1 + \frac{12e}{h^2} \cdot y \right).$$

Модуль градиента интенсивности касательных напряжений $T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma$ в этом случае

$$\text{grad} T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2} = \frac{F}{\sqrt{3}A} \cdot \frac{12e}{h^2}, \quad (6)$$

что приводит к выражению

$$E_{gr} = E_0 \frac{\lambda_E + \frac{12e}{h^2} (\lambda_E y + \frac{E_m}{E_0})}{\lambda_E + \frac{12e}{h^2} (\lambda_E y + 1)}. \quad (7)$$

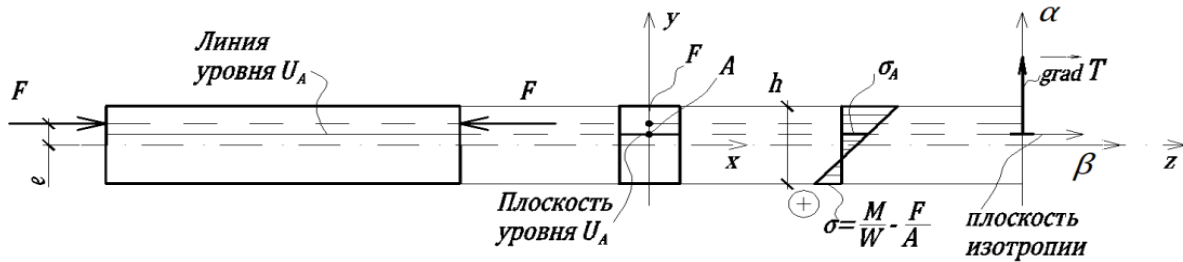


Рис. 2. Направление локальных осей при внецентренном сжатии стержня прямоугольного поперечного сечения

Отметим, что стержень имеет достаточно короткую длину, исключая потерю устойчивости, а точка приложения силы расположена на главной центральной оси инерции.

Анализируя последнее соотношение, убеждаемся в следующем:

- величина E_{gr} не зависит от величины приложенной продольной силы;
- градиентный модуль упругости – линейная функция координаты y и существующего внешнего параметра – эксцентриситета e ;
- при $e = 0$ имеем центральное сжатие и $E_{gr} = E_0$;
- при любых значениях эксцентриситета, кроме $e = 0$, $E_{gr} > E_0$;
- при фиксированном значении e наибольшее значение E_{gr} имеет место при $y = \frac{h}{2}$, т. е. в крайних волокнах.

При использовании относительного эксцентриситета $\tilde{e} = \frac{e}{h}$, который может изменяться в пределах $[0; \infty]$, для крайних волокон бруса из (7) при $E_m = 1,5E_0$ получим

$$E_{gr} = E_0 \cdot \frac{\lambda_E h + 3ex}{\lambda_E h + 2ex} = E_0 k_{gr}, \quad (8)$$

где обозначено $ex = \frac{6\tilde{e}}{1+6\tilde{e}}$.

Из анализа (8) следует:

- в стержне исчезающе малой высоты (при $h \rightarrow 0$) $E_{gr} \rightarrow E_m$;
- в стержне бесконечно большой высоты (при $h \rightarrow \infty$) $E_{gr} \rightarrow E_0$;
- при $\tilde{e} \rightarrow \infty$ (при чрезвычайно больших эксцентриситетах) и $E_m = 1,5E_0$.

$$E_{gr} \rightarrow \frac{\lambda_E h + 3}{\lambda_E h + 2} E_0,$$

что совпадает с E_{gr} в выражении (2) для случая чистого изгиба.

При расчете металлических конструкций широко используется понятие приведенного эксцентриситета, который в рассматриваемом случае равен

$$m = \frac{A}{W} e = \frac{6}{h} e = 6\tilde{e}.$$

Выражение (8) при использовании последнего приобретает вид

$$E_{gr} = E_0 \frac{\lambda_E h(1+m) + 3m}{\lambda_E h(1+m) + 2m}.$$

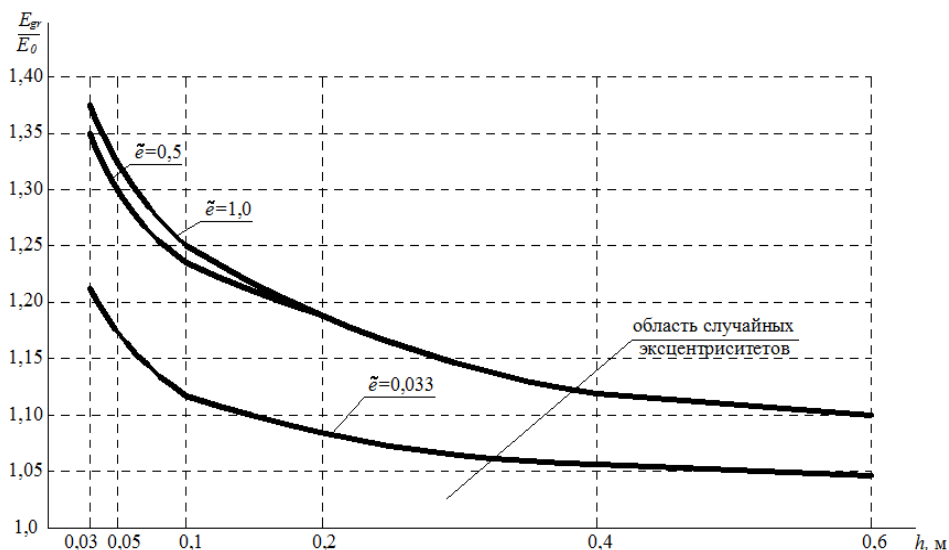


Рис. 3. График изменения градиентного модуля упругости при внецентренном сжатии в зависимости от высоты поперечного сечения при различных значениях относительных эксцентриситетов

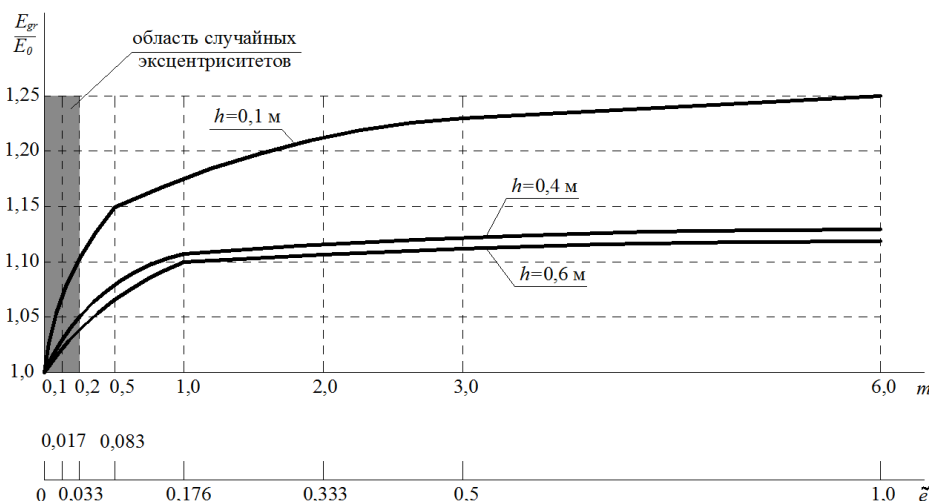


Рис. 4. График изменения градиентного модуля упругости при внецентренном сжатии в зависимости от величины приведенного и относительного эксцентриситетов

На рисунках 3 и 4 графически представлены результаты расчетов градиентных модулей упругости внецентренно сжатых стержней из упругого материала. Очевидно, что наиболее существенно эффект стеснения проявляется в стержнях с малой высотой поперечного сечения и при больших эксцентриситетах. Особо выделены области нормируемых случайных эксцентриситетов по работе [16], когда $e = \frac{1}{30}h$, (т. е.

$\tilde{e} = 0,033$) и нормируемых приведенных эксцентриситетов по [17], когда $m \leq 3$ (т. е. сжимающая сила находится в пределах поперечного сечения). Для практического использования при оценке деформативности стержня при внецентренном сжатии можно использовать совместно формулы (4) и (8). Значение коэффициентов для некоторых относительных эксцентриситетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Значения градиентного коэффициента деформативности $1/k_{gr}$ для различных высот поперечного сечения внецентренно сжатого стержня при некоторых относительных эксцентриситетах

Относительный эксцентриситет \tilde{e}	Высота сечения $h, м$								
	$<0,03$	$0,03 \leq h \leq 0,05$	$0,05 \leq h \leq 0,06$	$0,06 \leq h \leq 0,1$	$0,1 \leq h \leq 0,15$	$0,15 \leq h \leq 0,2$	$0,2 \leq h \leq 0,3$	$0,3 \leq h \leq 0,4$	$0,4 \leq h \leq 0,6$
0,033	0,83	0,85	0,87	0,9	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96
0,5	0,74	0,77	0,78	0,81	0,83	0,85	0,88	0,89	0,91
1,0	0,73	0,76	0,77	0,78	0,83	0,85	0,88	0,89	0,89

В предлагаемой модели деформирования при неоднородном распределении напряжений могут иметь место случаи, когда напряженно-деформированное состояние не просто симметрично, а когда в пределах геометрических размеров тела точки с одинаковым уровнем интенсивности касательных напряжений T образуют некоторую поверхность напряжений U . Если эта поверхность совпадает с координатными поверхностями системы координат, то имеют место случаи упругой симметрии индуцированной инкрементальной анизотропии. В зависимости от конфигурации деформируемого тела и системы координат существуют три случая упругой симметрии: сферическая, цилиндрическая или плоскостная [1].

Именно последняя встречается в рассмотренных выше случаях деформирования. В самом

деле поверхность напряжений представляет собой плоскость U_A , нормальную к оси y (рис. 1, 2). Плоскость изотропии совпадает с этой поверхностью, совокупность таких плоскостей совмещается со «слоями» материала и всегда параллельна плоскости XOZ .

Иная картина наблюдается при сжатии достаточно длинного гибкого стержня, когда встречается продольный изгиб.

Рассмотрим стержень прямоугольного сечения, нагруженный сжимающей силой F (рис. 5) в центре поперечного сечения. В нормативных документах и техрегламентах при расчете стержней на устойчивость по умолчанию принимается, что элементы являются идеальными телами без дефектов, а усилия и напряжения распределены равномерно по длине и поперечному сечению, материал однороден и изотропен в каждой точке.

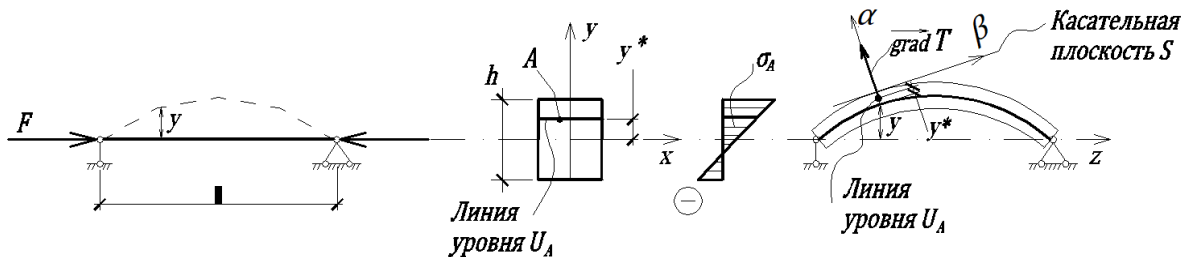


Рис. 5. Направление локальных осей при продольном изгибе стержня прямоугольного поперечного сечения

Предположим, что вследствие некоего малого постороннего возмущения стержень приобретает кривизну, характеризующуюся прогибом y . Это возмущение происходит одновременно с приложением силы F и может представлять собой начальную погибь, случайный эксцентриситет или воздействие малой поперечной нагрузки. В отклоненном состоянии стержень будет пребывать под продольной нагрузкой бесконечно долго, так как указанные нами возмущения неустранимы. В этом случае его напряженное состояние кроме сжатия характеризуется еще и изгибными напряжениями, следовательно, возможна неоднородность напряженного состояния. С учетом поперечной силы, возникающей в стержне от изгибающего момента, вызванного начальными несовершенствами, интенсивность касательных напряжений

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} (\sigma_z^2 + 3\tau_{zy}^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{F}{\sqrt{3}A} \left\{ \left(1 \pm \frac{12y}{b^2} \cdot y_* \right) \frac{3}{h^2 b^4} \left[12 \left(\frac{hb^2}{8} - hy_*^2 \right) \right]^2 \left(\frac{dy}{dz} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Учет поперечной силы в последнем выражении значительно усложняет процесс вычислений, при этом окончательный результат незначительно отличается от полученного без касательных напряжений. Это связано с тем, что в месте максимального прогиба в середине длины стержня поперечная сила равна нулю. К тому же в пределах сечения второе слагаемое в формуле (8) несущественно влияет на неоднородность

напряженного состояния. В наиболее напряженных фибровых волокнах касательное напряжение равно нулю, а наибольшее его значение оказывается вблизи нейтральной оси. В этой связи будем считать, что в пределах математической погрешности напряженное состояние достаточно точно характеризуется первым слагаемым в подкоренном выражении (8). Иными словами, если пренебречь касательными напряжениями, тогда в произвольной точке A

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \left(1 \pm \frac{12y}{h^2} \cdot y_* \right). \quad (10)$$

Неоднородность напряженного состояния создается по высоте поперечного сечения « h ». При этом в каждом сечении по длине стержня степень неоднородности различна из-за разной величины прогиба. Таким образом, создается трансверсальная анизотропия, индуцированная прогибом « y », которая функционально зависит от координаты по сечению y_* . Поверхность одинакового уровня напряжений U_A вырождается в линию (рис. 3). Касательная к ней плоскость P соответственно совпадает с плоскостью, касательной к изогнутой оси стержня S . Направление вектора-градиента T (значит и σ_z) нормально к плоскости S и, разумеется, линии L . Обозначив как ось α , примем направление оси y , совпадающей с линией L , а оси β – нормально к линии L в плоскости S (т. е. по касательной). Заметим, что слои материала по направлению α



спрессованы, значит модули упругости $E_\beta = E_{gr}$, а $E_\alpha = E_0$.

Модуль вектора-градиента с учетом (9)

$$gradT = \sqrt{\frac{\partial}{\partial y_*} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_z \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{F}{A} \cdot \frac{12y}{h^2}, \quad (10)$$

что в точности совпадает с выражением (6). Это подтверждает, что прогиб y в данном стержне в рассматриваемых выражениях исполняет ту же роль, что эксцентриситет e в коротком стержне.

Мера неоднородности напряженного состояния, характеризующаяся функцией

$$g = \frac{gradT}{T} = \frac{2}{h} \cdot \frac{6y}{h+6y}, \quad (11)$$

как и в случае чистого изгиба, обратно пропорциональна высоте поперечного сечения (в данном случае в плоскости наименьшей жесткости), но осложнена вторым множителем, который дает картину неоднородного распределения функции по длине и поперечным сечениям стержня.

При $E_m = 1,5E_0$ из (1) и (11) следует

$$E_{gr} = E_0 \left(\frac{\lambda_E + 1,5g}{\lambda_E + g} \right). \quad (12)$$

Приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня, описывающее связь изгибающего момента и кривизны,

$$y'' = \frac{M_x}{EJ_x}$$

с учетом (11–12) приобретает вид однородного дифференциального уравнения второго порядка

$$\frac{d^2 y}{dz^2} + \frac{F}{E_0 J_x} \cdot \frac{a+y}{a+1,5y} \cdot y = 0, \quad (13)$$

где $a = \frac{\lambda_E h^2}{12}$.

Проинтегрировать его в конечном виде не представляется возможным. Получение удовлетворительного решения (13) в Эйлеровом смысле также недостижимо.

Заключение

В настоящем исследовании проведено развитие ранее предложенных теоретических методов инкрементальной модели деформирования материала. В единой постановке рассмотрен вопрос упругого деформирования стержней при изгибе, внецентренном сжатии и продольном изгибе. Предлагается использовать повышенное значение модуля упругости через градиентный коэффициент при оценке деформативности элементов. Одновременное с этим обеспечение параметров механической безопасности может привести к снижению материалоемкости.

Список литературы

1. Гениев Г. А. Инкрементальная теория нелинейного деформирования тел в условиях неоднородного напряженного состояния : монография / Г. А. Гениев, С. Ю. Калашников. - Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2004. - 172 с.
2. Фадеев А. А. Особенности работы стали в элементах металлических конструкций при неравномерном распределении напряжений : автореф. дис. ... канд. тех. наук / А. А. Фадеев. - Москва, 1983. - 22 с.

Представляется перспективным использование повышенного значения модуля упругости для уточнения напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых и сжато изогнутых элементов конструкций.

Полученные результаты указывают на то, что удовлетворительной основой учета влияния неоднородного напряженного состояния на оценку деформирования материала могут быть предложенные в настоящей работе модели деформирования и расчетные соотношения. Предлагаемая модель деформирования является самостоятельной и не является частным случаем неоднородности или криволинейной анизотропии.

Приведенные в статье построения модели деформирования материала свидетельствуют о том, что неидеальные продольно сжимаемые стержни за счет технологических дефектов изготовления и монтажа деформации изгиба появляются в начальный момент нагружения. Возникающая вследствие этого неоднородность напряженного состояния создает индуцированную его видом криволинейную трансверсальную анизотропию со сложно изменяющимися в пределах размеров стержня упругими характеристиками.

Следующее из наличия начальных возмущений усложнение разрешающего уравнения выводит задачу сжатия простого гибкого стержня из задачи устойчивости первого рода. Более того, заявленные ранее причины неоднородности напряженного состояния, вызывающие изгиб с самого начала деформирования, усложнят уравнение (13), приводя его к неоднородному. В этом случае задача представляет собой исследование процесса устойчивости второго рода. Отметим, что в источнике [18] подчеркивается бесперспективность деления процесса потери устойчивости по родам.

Судить об исчерпании запаса устойчивости стержня в этом случае следует по превышению максимальным прогибом нормируемых значений соответствующих технических регламентов. Представляется целесообразным использовать полученные теоретические результаты для практической оценки диапазона запаса устойчивости стержней. В качестве способа реализации могут применяться приближенные методы. Например, метод Бубнова – Галеркина [19] или метод переменного параметра упругости [20].

Научная работа такой направленности выполняется впервые, полученные результаты свидетельствуют о необходимости распространения разрабатываемых предложений на более широкий круг задач.

3. Фадеев А. А. О переходе малоуглеродистой стали в упругопластическое состояние при неравномерном распределении напряжений (при чистом изгибе) / А. А. Фадеев // Исследования прочности элементов строительных металлических конструкций : труды института ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – 1982. – С. 85–91.
4. Campus F. Plastification de l'acier doux en flexion plane simple / F. Campus // Bull. de la classe des Sciences de la Academie R. de Belgique. – 1963. – Serie 5, 49, 4. – С. 303–314.
5. Dehousse N. M. Note relative a un phenomene de superelasticite en flexion constate lors d'essais d'un barreau en acier doux / N. M. Dehousse // Bull. de la Classe des sciences de la Academie R. de Belgique. – 1962. – Serie 5, 48. – С. 329–334.
6. König J. A. The yield criterion in the general case of nonhomogeneous stress and deformation fields / J. A. König, W. Olszak // Topics in Appl. continuum mech. – Wien – New York : Springer-Verlag, 1974. – С. 58–70.
7. Wo Guowei. Influence of stress distribution on yield limit / Wo Guowei, Jing Yangjie // J. Schanghai Jiatong. Univ. – 1984. - № 5. – С. 135–142.
8. Гениев Г. А. О построении инкрементальных условий пластичности / Г. А. Гениев, С. Ю. Калашников // Труды института ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – Москва, 1984. – 14 с.
9. Гениев Г. А. Об учете влияния неоднородности напряженного состояния на переход материала в пластическое состояние / Г. А. Гениев, С. Ю. Калашников // Строительная механика и расчет сооружений. – 1988. – № 6. – С. 12–15.
10. Калашников С. Ю. The incremental application for pure bending of a curved bar (Golovin problem) / С. Ю. Калашников, Е. В. Гурова, С. А. Калиновский // E3S Web of Conferences. Vol. 210 (2020) Innovative Technologies in Science and Education (ITSE-2020) (Divnomorskoe village, Russian Federation, August 19–30, 2020) / eds.: D. Rudoy, A. Olshevskaya, V. Kankhva. – [Published by EDP Sciences], 2020. – 6 p. – Режим доступа: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/70/e3sconf_itse2020_08017.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. – Doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021008017>.
11. Калашников С. Ю. Практические способы реализации инкрементальных условий пластичности в стержневых элементах строительных конструкций / С. Ю. Калашников, Е. В. Гурова, С. А. Калиновский // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2020. – Вып. 4 (81). – С. 6-14.
12. Гениев Г. А. О построении уравнений плоской задачи инкрементальной теории упругости / Г. А. Гениев, С. Ю. Калашников // Исследования по строительной механике и надежности конструкций : труды института ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – 1986. – С. 4–13.
13. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – Москва – Ленинград : Гостехтеориздат, 1950. – 300 с.
14. Балдин В. А. О сопротивлении стали деформированию при неравномерном распределении напряжений / В. А. Балдин, В. Н. Потапов, А. А. Фадеев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1982. – № 5. – С. 23–26.
15. Балдин В. А. Об учете пластических деформаций при неравномерном распределении напряжений по сечению / В. А. Балдин // Строительная механика и расчет сооружений. – 1977. – № 1. – С. 29–31.
16. Стрелецкий Н. С. Избранные труды / Н. С. Стрелецкий ; под ред. Е. И. Беленя. – Москва : Стройиздат, 1975. – 432 с.
17. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – Москва, Минстрой России, 2017. – 151 с.
18. Зубчанинов В. Г. Механика сплошных деформируемых сред / В. Г. Зубчанинов. – Тверь : Тверской государственный технический университет, 2000. – 704 с.
19. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем / А. С. Вольмир. – Москва : Физматгиз, 1963. – 880 с.
20. Биргер И. А. Некоторые математические методы решения инженерных задач / И. А. Биргер. – Москва : Оборонгиз, 1956. – 496 с.

© С. Ю. Калашников, Е. В. Гурова

Ссылка для цитирования:

Калашников С. Ю., Гурова Е. В. Упругое деформирование брусев при учете вида напряженного состояния в окрестности рассматриваемой точки // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2021. № 4 (38). С. 5–11.

УДК 721.021
DOI 10.52684/2312-3702-2021-38-4-11-17

ФРАКТАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ В ОРГАНИЗАЦИИ ГОРОДСКОЙ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ

О. М. Шенцова

Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Челябинск, Россия

Данная работа направлена на исследования в области применения методов фрактальной геометрии в проектировании архитектурной городской среды. При помощи фрактальной геометрии стало возможным определять способы формообразования архитектурных объектов и их дизайн, выявлять новые характерные особенности. Цель работы – выявить принципы применения фрактальных структур в формообразовании объектов городской архитектурной среды. В ходе этапа исследования были определены сущность понятий «фрактал», «фрактальность», обозначены их свойства и особенности, рассмотрены аналоги использования фрактальной геометрии в композиционных решениях объектов городской архитектурной среды с точки зрения фрактальной регулярности (упорядоченности) и нерегулярности (хаотичности). На основе анализа выявлены особенности, характерные для фрактальных объектов городской архитектурной среды.

Ключевые слова: архитектурная городская среда, фрактальная геометрия, архитектура, организация среды, архитектурное проектирование, фрактал, фрактальность.

FRactal Geometry in Organization of Urban Architectural Environment

O. M. Shentsova

South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia

This work is aimed at research in the field of application of fractal geometry methods in the design of an architectural urban environment. With the help of fractal geometry, it became possible to determine the ways of shaping architectural and design objects, to reveal their new characteristic features. The purpose of the work is to identify the principles of using fractal structures in the shaping of objects in the urban architectural environment. During the research stage, the essence of the concepts "fractal", "fractality" was determined, their