

**ОБ ЭФФЕКТЕ РЕАЛИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НАНУСТРУКТУРЫ ТРАДИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НЕСУЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Рудаков В.Н.¹, к.т.н., доц., Дорофеев В.С.², д.т.н., проф.,
Абракитов Д.В.¹, аспирант**

¹ *Харьковский Национальный университет городского хозяйства
им. А.Н. Бекетова;*

² *Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

Авторы полагают, что следует отметить заслуги одного из первых интерпретаторов основных механических характеристик конструкционных материалов (КМ) проф., д.т.н. В.А. Кузьменко, сотрудника института проблем прочности АН Украины [1]. Однако и он, к сожалению, в своей книге при анализе закономерностей поперечных деформаций твердого тела, практически руководствовался также механическими представлениями без физического обоснования [2].

Отметим, на наш взгляд, важнейшие выводы проф. В.А. Кузьменко. Механические свойства квазиизотропных конструкционных материалов, в первую очередь, могут быть представлены двумя основными материальными константами: модулем Юнга и коэффициентом Пуассона, полученным по результатам одного и того же простейшего опыта – одноосного нагруженного образца.

При этом важнейшей характеристикой следует считать коэффициент Пуассона – как источника информации о внутренних процессах в деформируемом теле. А более того, он непосредственно отображает особенность не только прямой деформации, происходящей в направлении действия внешней силы, но и поперечной, не совпадающей с направлением действия внешней силы. Поэтому коэффициент Пуассона ν является структурно чувствительной характеристикой.

Таким образом проф. В.А. Кузьменко косвенно подчеркивает неидентичность образования продольных и поперечных деформаций, т.е. модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Нужно отметить и то, что коэффициент Пуассона не является константой конструкционных материалов, а изменяется в широких пределах – от 0 до 0,50.

Еще раз отметим, что характер образования коэффициента Пуассона идентичен, как при одноосном сжатии, так и при одноосном

растяжении, но только для упруго-пластических твердых тел. Поэтому раскрытие механизма образования коэффициента ν при одноосном деформировании является не простой задачей, как представляется и без глубокого теоретического обоснования процесса формирования сдвиговых деформаций, и соответственно внутренних сил сдвига, который является ключевым при оценке всей совокупности механических свойств твердого тела, нельзя получить положительного результата.

Важным является и то, что характер процесса деформирования структурных квазиизотропных конструкционных материалов позволяет утверждать о возможности прогнозированного соотношения достоверных прочностных характеристик растяжения и сдвига деформируемого тела.

Но здесь соглашаясь принципиально с автором предлагаемой задачи мы вынуждены заметить, что по данным собственных исследований при одноосном растяжении упруго-пластического тела сопротивление растяжению является результирующим сопротивлением, равное геометрической сумме «межмолекулярного притяжения» и внутреннего трения (см, например, закон Б.В. Дерягина [3]).

Теперь рассмотрим реальный процесс деформирования конструкционного материала при осевом нагружении силой F , который характеризуется смещением (скольжением) наноструктурных элементов вдоль плоскостей скольжения (учитывая эффект поляризации), угол наклона ϕ которых к основанию опытного образца меняется в широких пределах. Сам же наноструктурный элемент не деформируется.

Поэтому для количественной оценки поперечных деформаций КМ (коэффициента Пуассона ν) посредством функции угла скольжения ϕ необходимо решить математическую задачу.

Для решения задачи на паритетных началах привлекаются:

а) геометрические уравнения Коши (элементы тензора деформаций), преобразованные для элементарного (размером ребра равного единице длины) куба [4...6]:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right). \quad (1)$$

При $i, k = 1, 2, 3$ имеем

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1}; & \varepsilon_{12} &= 1/2(\partial u_1/\partial x_1 + \partial u_2/\partial x_2); \\
\varepsilon_{22} &= \frac{\partial u_2}{\partial x_2}; & \varepsilon_{23} &= 1/2(\partial u_2/\partial x_2 + \partial u_3/\partial x_3); \\
\varepsilon_{33} &= \frac{\partial u_3}{\partial x_3}; & \varepsilon_{31} &= 1/2(\partial u_3/\partial x_3 + \partial u_1/\partial x_1).
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ - относительное смещение, соответственно, вдоль осей x_1, x_2 и x_3 ; $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{31}$ - относительное смещение за счет углового поворота, соответственно вдоль осей x_3, x_1 и x_2 ;

б) принцип независимости действия сил;

в) принцип ориентационной поляризации;

г) условия, соответствующие недеформируемой расчетной схеме;

$$\sigma_1 = 2\tau_1; \quad \sigma_2 = 2\tau_2; \quad \sigma_3 = 2\tau_3; \tag{3}$$

д) уравнения обобщенного закона Гука.

Также принимается, что под действием механического нормального напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ происходит смещение (скольжение) по направлению $(\pi/2 - \phi)$ относительно линии действия нормального напряжения (рис. 1).

Теперь преобразованные значения относительных смещений (скольжений) (1) в новой системе координат $1^*, 2^*, 3^*$, образующей за счет поворота осей 1, 2, 3 на угол $\alpha = (90 - \phi)^\circ$ согласно принципу суперпозиции, примут вид:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{11}^* &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1 \cdot \cos(90 - \phi)^\circ}; & \varepsilon_{12}^* &= 1/2(\varepsilon_{11}^* + \varepsilon_{22}^*) \cdot \cos \phi^\circ; \\
\varepsilon_{22}^* &= \frac{\partial u_2}{\partial x_2 \cdot \cos(90 - \phi)^\circ}; & \varepsilon_{23}^* &= 1/2(\varepsilon_{22}^* + \varepsilon_{33}^*) \cdot \cos \phi^\circ; \\
\varepsilon_{33}^* &= \frac{\partial u_3}{\partial x_3 \cdot \cos(90 - \phi)^\circ}; & \varepsilon_{31}^* &= 1/2(\varepsilon_{33}^* + \varepsilon_{11}^*) \cdot \cos \phi^\circ,
\end{aligned} \tag{4}$$

где $\varepsilon_{11}^*, \varepsilon_{22}^*, \varepsilon_{33}^*$ - полные относительные деформации (за счет изменения объема и формы) в системе координат $1^*2^*3^*$; $\varepsilon_{12}^*, \varepsilon_{23}^*, \varepsilon_{31}^*$ - то же, за счет поворота осей (формоизменения) [1,6].

По аналогии с выводом обобщенного закона Гука определяем полные относительные смещения (деформации) элемента в направлении первой, второй и третьей плоскости скольжения:

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_{11}^* - \varepsilon_{23}^*; \quad \varepsilon_2^* = \varepsilon_{22}^* - \varepsilon_{31}^*; \quad \varepsilon_3^* = \varepsilon_{33}^* - \varepsilon_{12}^*. \tag{5}$$

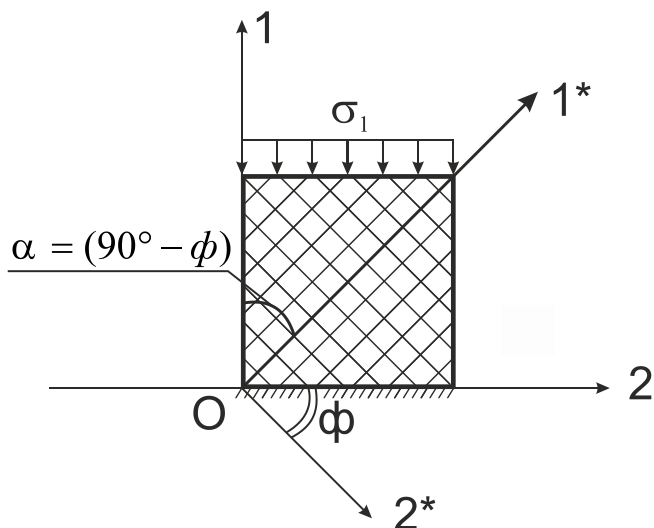


Рис. 1 - Поворот координатных осей 1, 2 на угол $\alpha = (90 - \phi)^\circ$.

Физический смысл уравнений (5) заключается в том, что одно напряжение вызывает удлинение элемента за счет смещения вдоль плоскости скольжения, а два других напряжения, лежащих в плоскости действия первого, вызывают укорочение за счет углового поворота. С учетом (3) и (4) и уравнений

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\tau_1}{G}; \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = \frac{\tau_2}{G}; \\ \varepsilon_{33} &= \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \frac{\tau_3}{G}, \end{aligned} \quad (6)$$

где G – модуль второго рода; зависимости (5) примут вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^* &= \frac{\sigma_1}{2G \cdot \sin \phi} - \frac{\cos \phi}{2 \sin \phi} \left(\frac{\sigma_2}{2G} + \frac{\sigma_3}{2G} \right); \\ \varepsilon_2^* &= \frac{\sigma_2}{2G \cdot \sin \phi} - \frac{\cos \phi}{2 \sin \phi} \left(\frac{\sigma_1}{2G} + \frac{\sigma_3}{2G} \right); \\ \varepsilon_3^* &= \frac{\sigma_3}{2G \cdot \sin \phi} - \frac{\cos \phi}{2 \sin \phi} \left(\frac{\sigma_1}{2G} + \frac{\sigma_2}{2G} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения (7) внешне напоминают уравнения обобщенного закона Гука. В качестве критерия адекватности принимается объемная относительная деформация, которая в рамках теории скольжения, с учетом (7) равна:

$$\theta^* = \varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* + \varepsilon_3^* = \frac{(1 - \cos \phi)}{2G \cdot \sin \phi} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = const. \quad (8)$$

Принимая во внимание (8) и

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G, \quad (9)$$

где ν - коэффициент Пуассона; и уравнения объемной относительной деформации в рамках обобщенного закона Гука

$$\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{(1 - 2\nu)}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = const, \quad (10)$$

получим:

$$tg(\phi/2) = \frac{(1 - \cos \phi)}{\sin \phi} = \frac{(1 - 2\nu)}{(1 + \nu)}; \quad (11)$$

$$\nu = [1 - tg(\phi/2)] / [2 + tg(\phi/2)]. \quad (12)$$

Очевидно, используя выражения (11) и (12) можно записать: при

$$\phi = 0 \rightarrow \nu = 0,50 \text{ (жидкость)}, \quad (13)$$

$$\phi = 90^\circ \rightarrow \nu = 0 \text{ (абсолютно твердое тело)}.$$

Для конструкционных поликристаллов зависимости (11) и (12) подтверждаются экспериментально (рис. 2).

Например, для алюминиевого сплава (АС) [7...9] среднее значение угла скольжения $\langle \phi \rangle = 30^\circ$, а коэффициента Пуассона $\langle \nu_{on} \rangle = 0,33$. Теоретическое значение коэффициента Пуассона согласно (12), принимается равным $\nu_m = 0,323$, т.е. расхождение составило

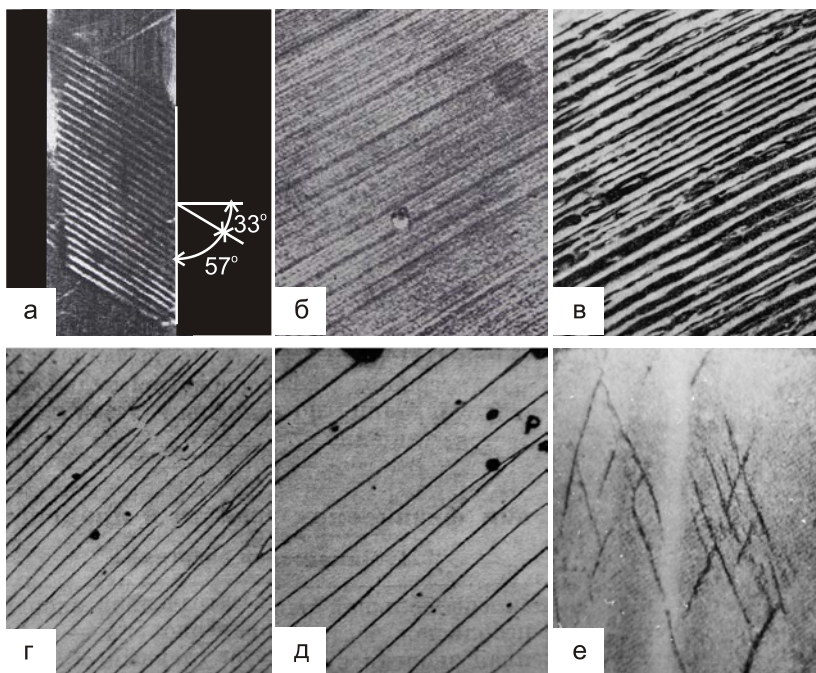
$$\Delta = \frac{(\langle \nu_{on} \rangle - \nu_m)}{\langle \nu_{on} \rangle} \cdot 100\% = \frac{(0,330 - 0,323)}{0,330} \cdot 100\% = 2,12\%.$$

То же, для железа и малоуглеродистых сталей при $\langle \phi \rangle = 37,5^\circ$ и $\langle \nu_{on} \rangle = 0,28$ [7,9,10], $\nu_m = 0,276$. Здесь расхождение составило

$$\Delta = \frac{(\langle \nu_{on} \rangle - \nu_m)}{\langle \nu_{on} \rangle} \cdot 100\% = \frac{(0,28 - 0,276)}{0,28} \cdot 100\% = 1,43\%.$$

Для чугуна, согласно данным А.П. Филина [11], среднее значение $\langle \phi \rangle \cong 45^\circ$ при $\langle \nu_{on} \rangle = 0,25$ [12], а $\nu_m = 0,243$. Расхождение будет равным

$$\Delta = \frac{(\langle \nu_{on} \rangle - \nu_m)}{\langle \nu_{on} \rangle} \cdot 100\% = \frac{(0,25 - 0,243)}{0,25} \cdot 100\% = 2,8\%.$$



*Рис. 2 - Линии скольжения на боковых поверхностях
опытных образцов:*

*а – алюминиевый сплав [7...9]; б – кристалл меди [14];
в – монокристалл алюминия [10]; г, д – кремнистое железо после
деформации и отжига [10]; е – полированный мрамор [7]*

Теперь для горных пород и конструкционного (тяжелого) бетона. По данным опытных испытаний на осевое сжатие мрамора [7] угол скольжения (разрушения) составил $\phi = 67^\circ$, а коэффициент Пуассона для него можно принять равным [13] $\langle \nu_{on} \rangle = 0,125$. Теоретическое значение коэффициента Пуассона для мрамора составило $\nu_m = 0,127$ при расхождении

$$\Delta = \frac{(\langle \nu_{on} \rangle - \nu_m)}{\langle \nu_{on} \rangle} \cdot 100\% = \frac{(0,127 - 0,125)}{0,125} \cdot 100\% = 1,6\% .$$

Результаты опытных испытаний конструкционного бетона, проведенных Б.Г. Скрамтаевым [15] и В.А. Бушковым [16], а также результаты анализа обширного материала экспериментальных исследований, полученных Я.В. Столяровым [17], позволяют принять

$\langle \phi \rangle = (60^\circ + 65^\circ + 70^\circ)/3 = 65^\circ$, а $\langle v \rangle = 0,5(1/7 + 1/8) = 0,134$ при $v_m = 0,138$ и расхождении

$$\Delta = \frac{(\langle v_{on} \rangle - v_m)}{\langle v_{on} \rangle} \cdot 100\% = \frac{(0,138 - 0,134)}{0,138} \cdot 100\% = 2,99\% .$$

Для плотного известняка – строительного материала пирамиды Хеопса [18]: угол разрушения (угол наклона боковой грани к основанию) $tg\phi = h/0,5a = 1,27324$; $\phi = 51,854^\circ$, $tg(\phi/2) = tg 25,927^\circ = 0,4862$.

Коэффициент Пуассона по зависимости (12):

$$v_m = [1 - tg(\phi/2)]/[2 + tg(\phi/2)] = (1 - tg 25,927^\circ)/(2 + tg 25,927^\circ) = (1 - 0,4862)/(2 + 0,4862) = 0,2067;$$

то же по геометрическим размерам пирамиды:

$$v^* = \left[\frac{a+b+c}{3} + \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \right] / \sqrt{2l} = \frac{\left[\frac{230,436 + 219,252 + 186,537}{3} + \sqrt[3]{230,436 \times 219,252 \times 186,537} \right]}{2 \times 1023,8} = 0,2067.$$

Опытное значение коэффициента Пуассона для конструкционного (плотного) известняка [19] меняется от 0,19 до 0,22 при среднем значении $\langle v \rangle = 0,205$ и расхождении

$$\Delta = \frac{\langle v_{on} \rangle - v_m}{v_{on}} \times 100\% = \frac{(0,205 - 0,2067)}{0,205} \times 100\% \equiv 0,83\% \dots$$

Вывод

В целом, как установлено [20...27] влияние наноструктуры на механические свойства конструкционных материалов весьма продуктивно и многообразно, так как выражается в разных формах, значительно повышая и технические, и экономические показатели строительной продукции.

Summary

The analytical results are confirmed by experimental data from independent studies of metals and rock. The article includes links to the results of our studies on the effect of accounting structure when determining the mechanical properties of the SM.

1. Кузьменко В.А. Новые схемы деформирования твердых тел. – Киев: «Наукова думка», 1993. – 200 с.

2. Гольшев А.Б. К критической оценке схемы поперечных деформаций в механике деформируемого твердого тела // Друга Всеукраїнська науково-

технічна конференція / Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. Зб. наукових праць. Вип. 50. – Київ, НДІБК, 1999. – с. 69-71.

3. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. - М.: Физматгиз, 1963, 472 с.

4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности, ползучести. 2-ое изд., исправл. и доп. – М.: «Высшая школа», 1968. – 512 с.

5. Ильющин А.А. Пластичность. Ч. I. Упруго-пластические деформации. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – 376 с.

6. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов / Пер. с англ. – М.: «Мир», 1976. – 671 с.

7. Надаи А. Пластичность и разрушение твёрдых тел / Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1954-647 с.

8. Томас Т. Пластическое течение и разрушение в твердых телах / Пер. с англ. – М.: «Мир», 1964. – 308 с.

9. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1978 – 368 с. с ил.

10. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Пер. с англ. – М.: «Мир», 1972 - 408 с.

11. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 1. – М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 832 с.

12. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. 14-ое изд. – М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1965. – 856 с.

13. Кузьмичев В.Б. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наук. думка, 1989. – 864 с. – Библиогр.: с. 846-848.

14. Современная кристаллография (в четырех томах). Том 4. Физические свойства кристаллов / Шувалов Л.А., Урусовская А.А., Желудев И.С. и др. - : Наука, 1981 - 496 с.

15. Скрамтаев Б.Г. Теория прочности бетона. Новые виды бетонов. - Харьков, «ОНТИ-НКТП». Государственное научно-техническое издательство Украины, 1934. – 66 с.

16. Бушков В.А. Железобетонные конструкции. Ч.1. – М.: Госстройиздат, 1940. – 158 с.

17. Столяров Я.В. Введение в теорию железобетона. – М.-Л.: Стройиздат Наркомстроя, 1941. – 448 с.

18. Фисанович Т.М. Таинственный мир пирамид – М.: РИПОЛ КЛАССИК, 2002 – 448 с.

19. Ржевский В.В., Новак Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Наука, 1964. – 208 с.

20. Дорофеев В.С., Рудаков В.Н. Расчет прочности изгибаемых конструкций по наклонным сечениям в рамках механики разрушения микрополяризованной среды (МПС) // Вісник ОДАБА. Вип. 24 – Одеса, «Місто майстрів», 2006. – с. 95-113.

21. Рудаков В.Н. Некоторые физические аспекты механики разрушения сжатых балок и сталебетонных конструкций // Вісник ОДАБА. Вип. 23 – Одеса, «Місто майстрів», 2006. – с. 273-285.

22. Рудаков В.Н., Дорофеев В.С., Молодченко Г.А. О технологии изготовления и методике испытания сталежелезобетонного элемента на

внецентренное сжатие // 36. наук. праць // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій / За загальною ред. Й.Й. Лучка – Вип. 7. – Львів: Каменяр, 2007. – с. 313-319.

23. Рудаков В.Н., Дорофеев В.С., Молодченко Г.А. Экспериментально-теоретические исследования внецентренно сжатого сталежелезобетонного элемента // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій / За загальною ред. Й.Й. Лучка – Вип. 7. – Львів: Каменяр, 2007. – С. 320-333.

24. Рудаков В.Н., Молодченко Г.А., Абракитов Д.В. Физические основы упрочнения конструкционного (тяжелого) бетона при осевом местном сжатии // Научно-технический сборник ХНАГХ. Вип. 90. Серия архитектура и технические науки. – Киев: Техника», 2009 – с. 474-482.

25. Рудаков В.Н., Дорофеев В.С., Молодченко Г.А., Абракитов Д.В. Теоретическое обоснование прочности типового монтажного стыка (до замоноличивания) сборной железобетонной колонны квадратного сечения каркаса многоэтажных и высотных зданий // Вісник ОДАБА. Вип. 37 – Одеса, Зовнішреклам-сервіс, 2010. – с. 281-299.

26. Рудаков В.Н., Дорофеев В.С., Молодченко Г.А., Абракитов Д.В. Нанотехнологические аспекты самоупрочнения конструкционного бетона при осевом местном сжатии под действием статической нагрузки // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вип. 56 – Дне-вск, ПГАСА, 2010. – с. 357-378.

27. Рудаков В.Н., Дорофеев В.С., Молодченко Г.А., Абракитов Д.В. Нанотехнологические аспекты оценки нормативных физико-механических характеристик конструкционного бетона в рамках теории скольжения микрополяризованной среды (МПС) при доверительной вероятности $V_{bkn} = (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01 B_1)$ // Вісник Дніпропетровського Національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 39. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – с. 180-190.