

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРОТКИХ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Узун И.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г.Одесса)

*Уточнены предпосылки расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и несущей способности коротких центрально сжатых трубобетонных элементов (ТБЭ), которые базируются на тщательном изучении параметров НДС тонкостенных и толстостенных ТБЭ.*

Вначале рассматриваем НДС тонкостенных ( $t < 0,03d$ ) сжатых ТБЭ [1]. При нагружении ТБЭ в них развиваются упругие и пластические деформации диаграммы нагрузка-продольные деформации ( $N - \epsilon$ ). Участки упругих и пластических деформаций по-разному выражены в ТБЭ, изготовленных из бетонных смесей с водоцементным отношением (В/Ц) 0,43 (серия А), 0,59 (серия Б), 0,9 (серия В). Длинный участок упругих деформаций характерен для ТБЭ серии А, который резко переходит в участок пластических деформаций (см. рис. 1). Призмная прочность  $R_b$  достигается при продольных деформациях  $70...90 \cdot 10^{-5}$ . В ТБЭ при продольных деформациях  $350...400 \cdot 10^{-5}$  нагрузка  $N = N_{max}$ , упрочнение ТБЭ на участке пластических деформаций незначительное.

В ТБЭ серии Б длина участка упругих деформаций укорачивается по сравнению с аналогичным участком в ТБЭ серии А. Призмная прочность достигается на участке упругих деформаций величиной  $80...100 \cdot 10^{-5}$ . После увеличения продольных деформаций до значений  $240...300 \cdot 10^{-5}$  нагрузка увеличивается незначительно, наблюдается процесс текучести ТБЭ. В ТБЭ с высокопрочным бетонным сердечником нагрузка  $N$  увеличивается до  $N_{max}$  при  $\epsilon = 450...500 \cdot 10^{-5}$ , при этом процесс текучести выражен слабо. Образование поперечных складок или разрыв стальной оболочки происходит при деформациях  $\epsilon \geq 600...700 \cdot 10^{-5}$  и объясняется увеличением объема бетонного сердечника, сопровождающегося процессом трещинообразования.

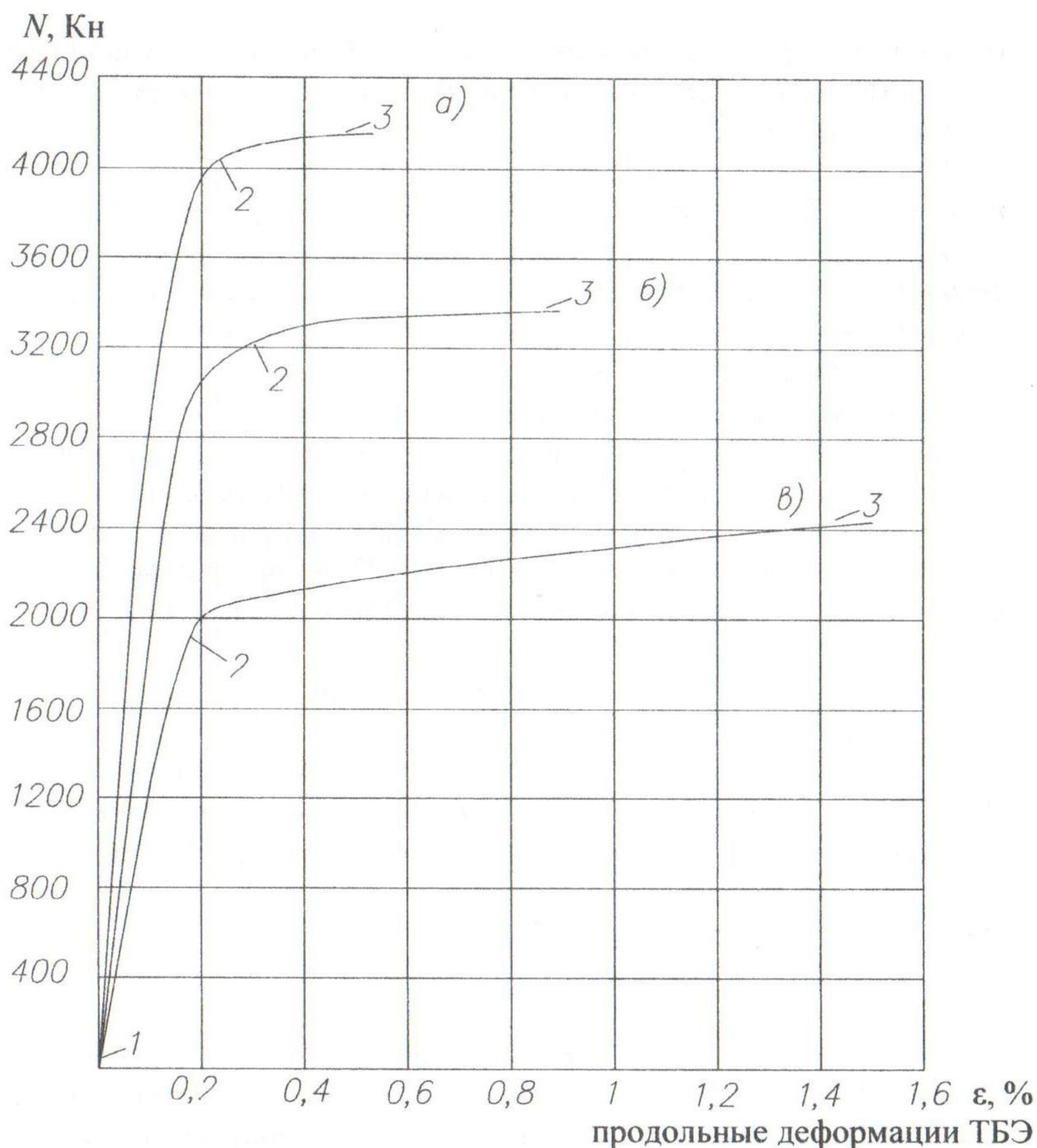


Рис. 1. Диаграммы деформирования тонкостенных ТБЭ [1]:  
 $d = 300$  мм;  $t = 3$  мм;  $l = 100$  см;  $\sigma_T = 27,23$  кН/см<sup>2</sup>;  
 а) – В/Ц = 0,9; б) – В/Ц = 0,59; в) – В/Ц = 0,43;  $1\% = 1000 \cdot 10^{-5}$ ;  
 1 – участок упругопластических деформаций;  
 2 – участок пластических деформаций.

В ТБЭ серии В восходящий участок диаграммы  $N - \epsilon$  криволинейный, короткий. Участок пластических деформаций длинный,  $\epsilon = 800 \dots 1500 \cdot 10^{-5}$ , ТБЭ обладают упрочнением. Призматическая прочность достигается на участке пластических деформаций диаграммы  $N - \epsilon_B$ , равных  $120 \dots 170 \cdot 10^{-5}$ . При продольных деформациях  $\epsilon = 1400 \cdot 10^{-5}$  кольцевые напряжения в

оболочке (в трубах) достигают величины 0,75 продольных напряжений текучести стали. При максимальной нагрузке трубы работают как обоймы, разрушение наступает при  $\varepsilon = 1600 \dots 2000 \cdot 10^{-5}$ .

Анализ результатов исследований [1, 2, 3] показывает, что в начале нагружения ТБЭ труба работает как продольная арматура. При деформации  $\varepsilon = 200 \cdot 10^{-5}$  обжатие сердечника трубой увеличивается, кольцевые напряжения составляют 1/5...1/6 предела текучести стали. При деформации  $\varepsilon = 200 \cdot 10^{-5}$  нагрузка на ТБЭ составляет в серии А 95%  $N_{\max}$ , в серии Б – 88%  $N_{\max}$  и в серии В – 76%  $N_{\max}$ .

С ростом продольных деформаций ( $\varepsilon > 210 \cdot 10^{-5}$ ) процессы перераспределения напряжений в стенках трубы интенсифицируются: кольцевые растут, продольные напряжения понижаются. С ростом нагрузки продольные напряжения в бетоне возрастают, превосходя призмную прочность в 1,5...3 раза [1,2,3], но при разных величинах деформаций (у разных авторов) –  $250 \dots 350 \cdot 10^{-5}$  [2],  $400 \dots 550 \cdot 10^{-5}$  [3] и  $500 \dots 1500 \cdot 10^{-5}$  [1].

Разрушение бетонных сердечников ТБЭ происходит по схеме разрушения бетонных стандартных призм от продольных трещин. Разрушение высокопрочных бетонных сердечников (из бетона классов В30...В50) происходит и от сдвига верхней части по отношению к нижней под углом  $30^\circ$  к вертикальной оси. В стальной оболочке ТБЭ в предельной стадии развиваются деформации текучести, повторяя деформации бетонного сердечника.

Поведение толстостенных ТБЭ ( $t > 0,03d$ ) при нагружении отличается от поведения тонкостенных ТБЭ. Главное отличие в том, что на диаграмму  $N - \varepsilon$  преобладающее влияние оказывает сопротивление стальной трубы. Диаграммы  $N - \varepsilon$  ТБЭ аналогичны диаграммам  $N - \varepsilon_s$  отдельно испытанных труб (см. рис.2). Анализ диаграмм  $N - \varepsilon$  показывает, что с ростом деформаций растет нагрузка, воспринимаемая бетонным сердечником, однако, при деформациях  $200 \dots 500 \cdot 10^{-5}$  усилие  $N_b$ , воспринимаемое бетонным сердечником, намного меньше усилия  $N$ , воспринимаемого ТБЭ. На участке 2-3 пластических деформаций наблюдается значительное упрочнение ТБЭ, однако, при очень больших величинах деформаций  $1000 \dots 1800 \cdot 10^{-5}$  это упрочнение ТБЭ происходит за счет упрочнения металла оболочки и бетона, заключенного в трубе.

В ТБЭ с толстостенными трубами максимальная нагрузка фиксируется при больших величинах деформаций –  $5000 \dots 7000 \cdot 10^{-5}$ . Несмотря на большие продольные и поперечные деформации ТБЭ при нагружении не раз-

рушаются, а только меняют первоначальную форму. В аварийных ситуациях такое поведение ТБЭ позволяет эвакуировать людей из зданий. Коэффициент эффективности работы бетонного сердечника  $\beta$  в толстостенных ТБЭ ниже ( $\beta = 1,1 \dots 2$ ), чем коэффициента  $\beta$  в тонкостенных ТБЭ.

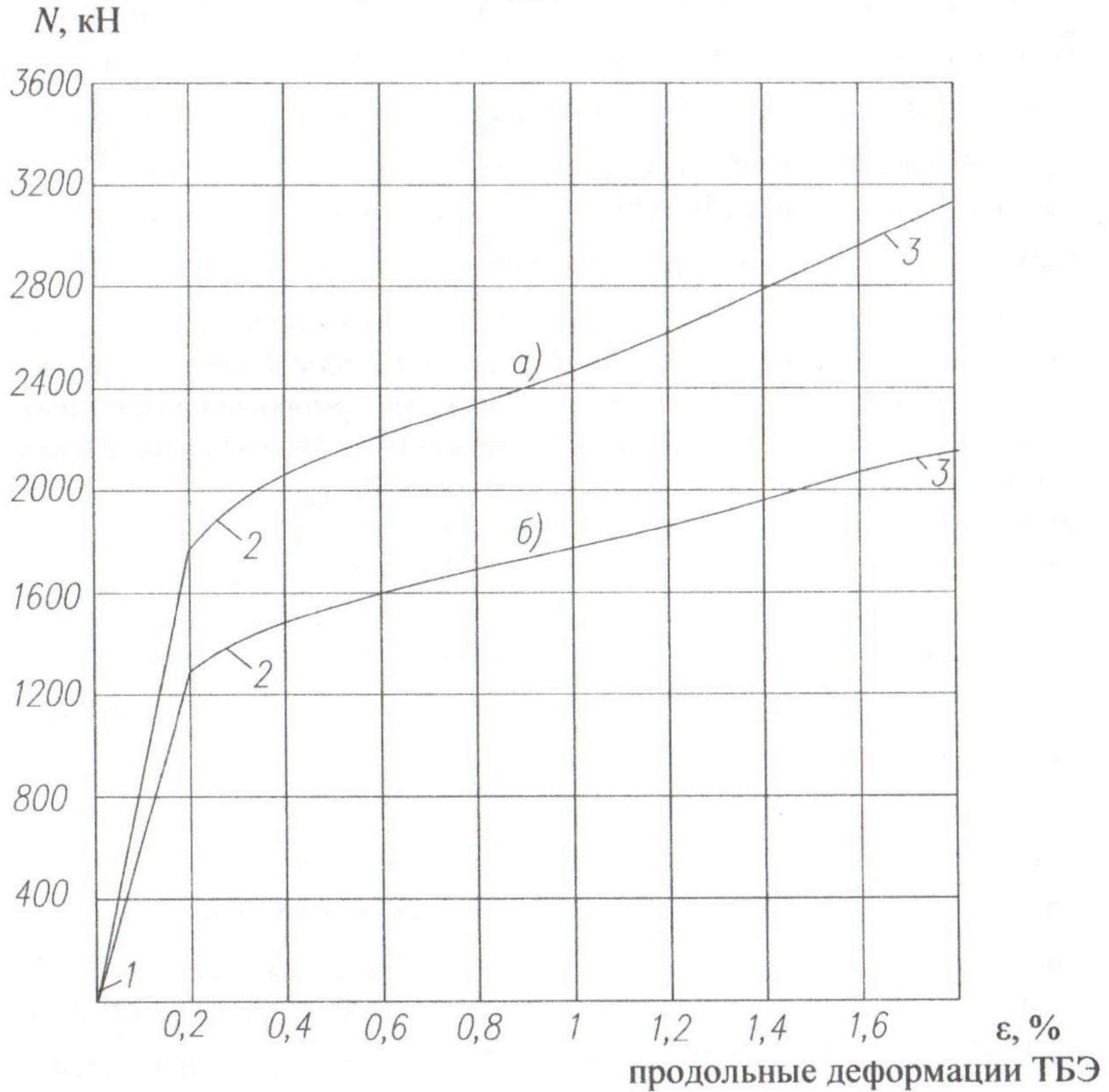


Рис. 2. Диаграмма деформирования толстостенного ТБЭ [1]:  
 $d = 124$  мм;  $t = 8$  мм;  $l = 40$  см;  $\sigma_r = 91,9$  кН/см<sup>2</sup>; а) диаграмма ТБЭ;  
 б) диаграмма отдельно испытанной трубы;  $1\% = 1000 \cdot 10^{-5}$ ;  
 1 – участок упругопластических деформаций;  
 2 – участок пластических деформаций.

Изучение НДС коротких ТБЭ и предварительные расчеты показали следующее. Диаграммы деформирования ТБЭ имеют восходящие ветви упру-

гопластических деформаций 1-2 и участки разной длины и с разными углами подъема, что связано с размерами ТБЭ, размерами труб, составами бетонов. Форма диаграмм  $N - \varepsilon$  нагружения ТБЭ обусловлена разными диаграммами деформирования бетонных сердечников  $\sigma_{\sigma}^* - \varepsilon_{\sigma}$  и разными диаграммами деформирования стальных оболочек  $\sigma_s - \varepsilon_s$ . Сложность построения диаграмм  $\sigma_{\sigma}^* - \varepsilon_{\sigma}$  и  $\sigma_s - \varepsilon_s$  вызвана изменчивостью коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$ , определяющих величины напряжений при максимальных нагрузках и соответствующих им деформациях. Поэтому требуется уточнения форма диаграмм  $\sigma_{\sigma}^* - \varepsilon_{\sigma}$  и  $\sigma_s - \varepsilon_s$ , обеспечивающая точность построения диаграмм  $N - \varepsilon$  при нагружении ТБЭ. В связи с изложенным могут быть приняты следующие предпосылки расчета НДС и несущей способности коротких центрально сжатых ТБЭ: 1 – форма диаграмм деформирования бетонных сердечников и стальных оболочек (труб) может быть принята в виде парабол с переменными параметрами в конце диаграмм:  $R_{s, \text{exp}}^*$ ,  $R_{\text{в, exp}}^*$  – при сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными,  $R_{s, \text{ser}}^*$ ,  $R_{\text{в, ser}}^*$  – при расчете по предельным состояниям II группы,  $R_s^*$ ,  $R_{\text{в}}^*$  – при расчете по предельным состояниям I группы и соответствующими деформациями, изменяемыми от  $500 \cdot 10^{-5}$  до  $200 \cdot 10^{-5}$ . Здесь  $R_{s, \text{exp}}^* = \alpha \cdot R_{s, \text{exp}}$ ;  $R_{\text{в, exp}}^* = \beta \cdot R_{\text{в, exp}}$  и т.д. 2 – коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  принимаются средними по результатам исследований [1, 2, 3]. 3 – окончательно параметры диаграмм  $\sigma_{\sigma}^* - \varepsilon_{\sigma}$  и  $\sigma_s - \varepsilon_s$  уточняются расчетом по теории, изложенной в работе [2]. 4 – диаграммы деформирования оболочек и бетонных сердечников трубобетонных элементов  $\sigma_s - \varepsilon_s$  и  $\sigma_{\sigma}^* - \varepsilon_{\sigma}$ , полученные на основе диаграмм нагрузка-продольные деформации  $N - \varepsilon$  и нагрузка-поперечные деформации  $N - \varepsilon_{\pi}$ , могут использоваться в расчетах параметров НДС и несущей способности коротких ТБЭ по методике, изложенной в работе [2].

## Литература

1. Липатов А.Ф. Исследование прочности трубобетонных элементов // Исследование железобетонных мостовых конструкций. Труды ЦНИИС, Выпуск 19. – М.: Трансжелдориздат. – 1956. – С. 251-298
2. Кипин А.И., Санжаровский Р.С., Труль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. – М.: Стройиздат. – 1974. – 144 с.
3. Стороженко Л.И., Плахотный П.И., Черный А.Я. Расчет трубобетонных конструкций. – К.: – Будивэльнык. – 1991. – 120 с.