

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРМАТУРНОЇ СТАЛІ

В.А. Огородніков, Ю.С. Бікс

Вступ

Тенденції розвитку сучасного будівництва в Україні спрямовані головним чином на енергозбереження, ресурсозбереження та підвищення якості сучасних будівельних матеріалів та конструкцій.

Роль металевих конструкцій та конструкцій з легких сплавів на сьогоднішній день важко переоцінити. Одним із нагальних питань є удосконалення використання металевих конструкцій, застосування конструкцій мінімальної ваги без втрат запасу міцності. Це стає можливим при використанні металу в пластичній зоні, при застосуванні положень феноменологічної теорії деформуєності.

Метод розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами, які прийняті у вітчизняних нормах проектування, вимагає, зокрема, знання механічних властивостей арматури, які представляють у вигляді спеціальних функцій, які формують “карту” матеріала.

Основними механічними властивостями арматурної сталі, які визначають її нормативні та розрахункові характеристики є:

- межа текучості $\sigma_T(\sigma_{0,2})$;
- тимчасовий опір σ_B ;
- відношення тимчасового опору до межі текучості σ_B/σ_T ;
- відносне рівномірне видовження ϵ_p ;
- відносне видовження ϵ ;
- модуль пружності E_s .

Для маловуглецевої сталі та сталі з підвищеною міцністю за межею текучості σ_T призначають нормативний опір R_{ym} сталі при розтягу, стиску та згину, тобто $R_{ym} = \sigma_T$.

Для сталі високої міцності, для якої при випробуванні площадка текучості незначна або відсутня взагалі, нормативний опір приймають рівним тимчасовому опору розриву, тобто $R_{um} = \sigma_B$. В сталі, де допустимий розвиток великих пластичних деформацій, нормативний опір також встановлюють за тимчасовим опором розриву або $R_{um} = \sigma_B$.

Головним чином арматура в залізобетонних конструкціях сприймає розтягуючі зусилля. Однак часто виникають ситуації, коли арматура працює в складному напруженому стані: розтяг із зсувом, згин із зсувом, згин з розтягом і таке інше. Вказані складні види завантаження змінюють картину виявлення механічних властивостей досліджуваних сталей. Тут недостатньо знати лише стандартні характеристики, наведені вище.

Як правило, в традиційних методах розрахунку металевих конструкцій не враховується немонотонне складне деформування, а саме: навантаження-розвантаження, ефект Баушингера, зміна знаку деформацій, принцип запізнення, і таке інше. В таких складних умовах деформування властивості матеріалу визначаються функціями матеріалу, які набули останнім часом широкого застосування як в технологічній механіці так і в будівельній механіці. Такими функціями є крива течії в координатах: інтенсивність напруження-інтенсивність деформації, яка не залежить від напруженого стану, а лише від матеріалу; діаграма пластичності в координатах: показник напруженого стану, інтенсивність деформацій накопичених до руйнування.

Вид цих діаграм дозволяє визначити спроможність матеріалу сприймати зміну гідростатичного тиску при різних навантаженнях.

Ці, більш ширші уявлення про властивість матеріалу дозволяють збільшити несучу здатність металоконструкцій, привести до економії металу. Насамперед це пов'язано з дозволом охопити пластичною деформацією, весь переріз сталі, що деформується, більше ніж це передбачено чинними нормах проектування. Це дозволяє зменшити витрати металу, заощадити витрати праці на монтажі конструкцій, отримати конструкцію мінімальної ваги без втрати запасу міцності.

Постановка задачі

Отримати функції матеріалу зазначені вище, з метою отримання розрахункового апарату для проектувальників, конструкторів, технологів при виготовленні металоконструкцій, залізобетонних конструкцій, зекономити метал, підвищити несучу здатність металевих елементів конструкцій.

Результати

Нами експериментально було побудовані крива течії та діаграма пластичності в координатах, наведених вище, для арматурного прокату серповидного профілю класу А500С зі сталі Ст3Гпс. Всі зразки для експерименту-стандартної форми, виготовлені відповідно з арматурного прокату А500С.

Для проведення експерименту були виготовлені зразки зі сталі Ст3Гпс, з якої виготовляється арматурний прокат серповидного профілю класу А500С, діаметром $d=20\text{мм}$:

Для випробування на розтяг-2шт.

Для випробування на кручення-2шт.

Для випробування на стиск-10 шт.



Рис. 1. Дослідні зразки для випробувань

Розміри зразків надані у відповідності до стандартних зразків для випробувань.

Діаграми пластичності досліджуваних сталей будували в координатах: e_p – гранична деформація накопичена на всіх етапах деформування, інтенсивність деформацій в момент руйнування [1]; η – показник напруженого стану за методикою, викладеною в роботі [2],

$$e_p = \int_0^{\epsilon_p} \epsilon_i d\epsilon_i \quad (1)$$

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} \quad (2)$$

де σ – середній нормальний тиск; σ_i – інтенсивність напружень.

З метою побудови діаграми пластичності виготовили зразки на розтяг. Випробування зразків на розтяг проводили на універсальній розривній машині Р-20 (рис. 2) з механічним приводом і ричажним маятником силовимірювача до 196 кН (20т).



Рис. 2. Універсальна машина Р-20 з досліджуваним зразком

Діаграма пластичності відображає залежність пластичності(накопиченої граничної деформації до руйнування) від показника напруженого стану η , який відображає вплив відносного гідростатичного тиску на пластичність.

Машина призначена для випробування зразків металу на розтяг при нормальних умовах за ГОСТ 1497 - 73. Граничну деформацію ϵ_p при розтягу розраховували як:

$$\dot{d}_o = 2 \ln \frac{d_o}{d}$$

при цьому показник напруженого стану $\eta=1$. Якщо при розтягу утвориться шийка, показник напруженого стану розраховували за запропонованою методикою [6], як:

$$\eta = 1 + 3 \ln \left(1 + \frac{d_{\dot{\epsilon}o}}{4} \cdot \nu \right) \quad (3)$$

$$d_{\dot{\epsilon}o} = \frac{d_o + d_{\dot{\epsilon}o}}{2 \cdot 1,11} \quad (4)$$

де $d_{кр}$ – значення діаметра, який визначають в момент зародження макротріщини:

$$\nu = D \cdot \exp \left(-\frac{d_o}{f} \right) \quad (5)$$

де $D = 1,318 \text{ мм}^{-1}$;
 $f = 1,86 \text{ мм}$;
 $d_{ш}$ – діаметр зразка в місці утворення шийки, мм;

$$\nu = \frac{1}{R} \quad (6)$$

$$R = \frac{l^2 + 4h^2}{8h} \quad (7)$$

де R – текучий радіус кривизни меридіонального перерізу шийки зразка;
 h – глибина впадини шийки;
 l – хорда.

Дослідження на кручення проводили із стандартними зразками на машині КМ-50 (рис. 3), призначеній для досліджень зразків на кручення з максимальним крутним моментом 500 Нм. Машина оснащена електромеханічним приводом активного захоплення, має електричний тип моментовимірювача. Зусилля, що прикладається до зразка, сприймалося пружним елементом моментовимірювача. Пружний елемент, деформуючись, викликав зміну значення навантаження циркуляційного датчика. Зміна напруження передавалася на відліковий пристрій. Одночасно на діаграмі апарата вівся запис діаграми: "крутний момент – кут закручування". Граничну деформацію при крученні визначаємо за формулою

$$e_p = \frac{tg\alpha}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

де α – кут зсуву на поверхні зразка після руйнування.

Показник напруженого стану η при крученні дорівнює нулю $\eta=0$, тому що, згідно з [2] $\sigma_1=\tau$, $\sigma_2=0$, $\sigma_3=-\tau$.



Рис. 3. Загальний вигляд машини КМ-50 з досліджуваним зразком

Крім того, зразки випробували на стиск аж до руйнування за методикою, викладеною в [3], при цьому граничну деформацію розраховували за формулою:

$$\dot{a}_d = 2 \ln \frac{h_0}{h}; \quad (9)$$

де h_0 – вихідна висота зразка;

h – висота зразка після руйнування, показник напруженого стану $\eta=-1$ (якщо бочка відсутня).

Отримані експериментальні значення граничних деформацій при різних показниках напруженого стану $\eta=1$, $\eta=0$, $\eta=-1$, $\eta>1$ (врахування шийкоутворення); $-1<\eta<0$ (різні умови тертя в контакті); дозволили побудувати діаграми пластичності сталі Ст3Гпс в стані постачання, які показані на рис. 4-5. При побудові діаграм пластичності використовували апроксимацію В.А. Огороднікова.[1] Всі результати випробувань зведені у таблицю.

Таблиця 1

Дані для побудови діаграми пластичності. Випробування на стиск

| P, кг | $d_{сер.}$, мм | A, мм ² | σ_u , МПа | d_0 , мм | d_i , мм | h_0 , мм | h_i , мм | ϵ_u , за діаметром | ϵ_u , за висотою |
|-------|-----------------|--------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|---------------------------|
| 0 | 9,93 | 77,44 | 0 | 9,93 | 9,930 | 14,06 | 14,06 | 0 | 0 |
| 4000 | 10,45 | 85,77 | 466,38 | 9,93 | 10,450 | 14,06 | 13,85 | 0,102 | 0,015 |
| 8000 | 11,475 | 103,42 | 773,56 | 9,93 | 11,475 | 14,06 | 11,00 | 0,289 | 0,245 |
| 11000 | 13,05 | 133,75 | 822,39 | 9,93 | 13,050 | 14,06 | 8,60 | 0,546 | 0,491 |
| 14000 | 14,375 | 162,29 | 862,62 | 9,93 | 14,375 | 14,06 | 7,15 | 0,740 | 0,676 |
| 18000 | 15,85 | 197,31 | 912,27 | 9,93 | 15,850 | 14,06 | 5,9 | 0,935 | 0,868 |
| 22000 | 16,575 | 215,77 | 1019,59 | 9,93 | 16,575 | 14,06 | 5,35 | 1,025 | 0,966 |
| 26000 | 17,55 | 241,90 | 1074,80 | 9,93 | 17,550 | 14,06 | 4,8 | 1,139 | 1,075 |
| 30000 | 18,55 | 270,26 | 1110,05 | 9,93 | 18,550 | 14,06 | 4,25 | 1,250 | 1,196 |
| 35000 | 19,7 | 304,80 | 1148,27 | 9,93 | 19,700 | 14,06 | 3,85 | 1,370 | 1,295 |
| 40000 | 20,75 | 338,16 | 1182,86 | 9,93 | 20,750 | 14,06 | 3,45 | 1,474 | 1,405 |
| 49000 | 22,175 | 386,20 | 1268,76 | 9,93 | 22,175 | 14,06 | 3,00 | 1,607 | 1,544 |

Таблиця 2

Дані для побудови діаграми пластичності. Випробування на розтяг (зразок №1)

| №п/п | P_i , см | масшт. коеф | L_0 , см | L_i , см | d_0 , см | σ_i , Мпа | ϵ_i , за L | d_i , мм | ϵ_i , за d |
|------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------------|---------------------|------------|---------------------|
| 1 | 8.7 | 323.08 | 10.26 | 10.361 | 1.0202 | 340.5278 | 0.0098 | 1.0152 | 0.0098 |
| 2 | 12 | 323.08 | 10.26 | 10.461 | 1.0202 | 465.1724 | 0.0194 | 1.0103 | 0.0194 |
| 3 | 12.8 | 323.08 | 10.26 | 10.562 | 1.0202 | 491.4532 | 0.0290 | 1.0055 | 0.0290 |
| 4 | 13.7 | 323.08 | 10.26 | 10.663 | 1.0202 | 521.0408 | 0.0385 | 1.0007 | 0.0385 |
| 5 | 14.5 | 323.08 | 10.26 | 10.764 | 1.0202 | 546.3072 | 0.0479 | 0.9960 | 0.0479 |
| 6 | 15.1 | 323.08 | 10.26 | 10.864 | 1.0202 | 563.6398 | 0.0572 | 0.9914 | 0.0572 |
| 7 | 15.4 | 323.08 | 10.26 | 10.965 | 1.0202 | 569.5587 | 0.0664 | 0.9868 | 0.0664 |
| 8 | 15.6 | 323.08 | 10.26 | 11.066 | 1.0202 | 571.7051 | 0.0756 | 0.9823 | 0.0756 |
| 9 | 15.7 | 323.08 | 10.26 | 11.166 | 1.0202 | 570.1811 | 0.0846 | 0.9779 | 0.0846 |
| 10 | 15.7 | 323.08 | 10.26 | 11.267 | 1.0202 | 565.0850 | 0.0936 | 0.9735 | 0.0936 |
| 11 | 15.3 | 323.08 | 10.26 | 11.368 | 1.0202 | 545.8097 | 0.1025 | 0.9692 | 0.1025 |
| 12 | 14.2 | 323.08 | 10.26 | 11.468 | 1.0202 | 502.1205 | 0.1113 | 0.9649 | 0.1113 |
| 13 | 12.5 | 323.08 | 10.26 | 11.569 | 1.0202 | 438.1602 | 0.1201 | 0.9607 | 0.1201 |

Продовження таблиці 2
Дані для побудови діаграми пластичності. Випробовування на розтяг (зразок №2)

| №п/п | R _i ,см | масшт.коэф | L ₀ ,см | L _i ,см | d ₀ ,см | σ _i ,Мпа | ε _i ,за L | d _i ,мм | ε _i ,за d |
|------|--------------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 5 | 317.3 | 10.68 | 10.785 | 1.007 | 197.2615 | 0.0098 | 1.0021 | 0.0098 |
| 2 | 11.7 | 317.3 | 10.68 | 10.89 | 1.007 | 457.1413 | 0.0195 | 0.9972 | 0.0195 |
| 3 | 12.2 | 317.3 | 10.68 | 10.995 | 1.007 | 472.1251 | 0.0291 | 0.9925 | 0.0291 |
| 4 | 13.2 | 317.3 | 10.68 | 11.1 | 1.007 | 505.9918 | 0.0386 | 0.9878 | 0.0386 |
| 5 | 14 | 317.3 | 10.68 | 11.205 | 1.007 | 531.6290 | 0.0480 | 0.9831 | 0.0480 |
| 6 | 14.6 | 317.3 | 10.68 | 11.31 | 1.007 | 549.2660 | 0.0573 | 0.9786 | 0.0573 |
| 7 | 15 | 317.3 | 10.68 | 11.415 | 1.007 | 559.1236 | 0.0666 | 0.9740 | 0.0666 |
| 8 | 15.3 | 317.3 | 10.68 | 11.52 | 1.007 | 565.1080 | 0.0757 | 0.9696 | 0.0757 |
| 9 | 15.5 | 317.3 | 10.68 | 11.625 | 1.007 | 567.3241 | 0.0848 | 0.9652 | 0.0848 |
| 10 | 15.6 | 317.3 | 10.68 | 11.73 | 1.007 | 565.8732 | 0.0938 | 0.9609 | 0.0938 |
| 11 | 15.6 | 317.3 | 10.68 | 11.835 | 1.007 | 560.8527 | 0.1027 | 0.9566 | 0.1027 |
| 12 | 15.1 | 317.3 | 10.68 | 11.94 | 1.007 | 538.1026 | 0.1115 | 0.9524 | 0.1115 |
| 13 | 14.3 | 317.3 | 10.68 | 12.045 | 1.007 | 505.1516 | 0.1203 | 0.9482 | 0.1203 |

Таблиця 3

Опрацювання даних для побудови діаграми пластичності

| № п/п | ε _u | σ _u ,наближене | A | n | n, сер | σ _u ,за апроксимацією Огороднікова | σ _{сер} ,МПа | ε _{сер} |
|-------|----------------|---------------------------|------|--------|--------|---|-----------------------|------------------|
| 1 | 0.05 | | 1032 | | 0.2703 | 459.228 | | |
| 2 | 0.1 | 563.7 | 1032 | 0.2626 | 0.2703 | 553.851 | 461.1568 | 0.0195 |
| 3 | 0.2 | 672.2 | 1032 | 0.2664 | 0.2703 | 667.970 | 481.7891 | 0.0290 |
| 4 | 0.3 | 752 | 1032 | 0.2629 | 0.2703 | 745.336 | 513.5163 | 0.0385 |
| 5 | 0.4 | 808.9 | 1032 | 0.2658 | 0.2703 | 805.604 | 538.9681 | 0.0479 |
| 6 | 0.5 | 855.23 | 1032 | 0.2711 | 0.2703 | 855.688 | 556.4529 | 0.0573 |
| 7 | 0.6 | 898.3 | 1032 | 0.2716 | 0.2703 | 898.911 | 564.3412 | 0.0665 |
| 8 | 0.7 | 936.07 | 1032 | 0.2735 | 0.2703 | 937.156 | 568.4066 | 0.0757 |
| 9 | 0.8 | 969.375 | 1032 | 0.2805 | 0.2703 | 971.597 | 568.7526 | 0.0847 |
| 10 | 0.9 | 1002.2 | 1032 | 0.2781 | 0.2703 | 1003.026 | 565.4791 | 0.0937 |
| 11 | 1 | | 1032 | | 0.2703 | 1032.000 | 553.3312 | 0.1026 |
| 12 | 1.1 | | 1032 | | 0.2703 | 1058.931 | n, середнє 0.2703 | |
| 13 | 1.2 | | 1032 | | 0.2703 | 1084.130 | | |
| 14 | 1.3 | | 1032 | | 0.2703 | 1107.840 | | |
| 15 | 1.4 | | 1032 | | 0.2703 | 1130.254 | | |
| 16 | 1.5 | | 1032 | | 0.2703 | 1151.529 | | |

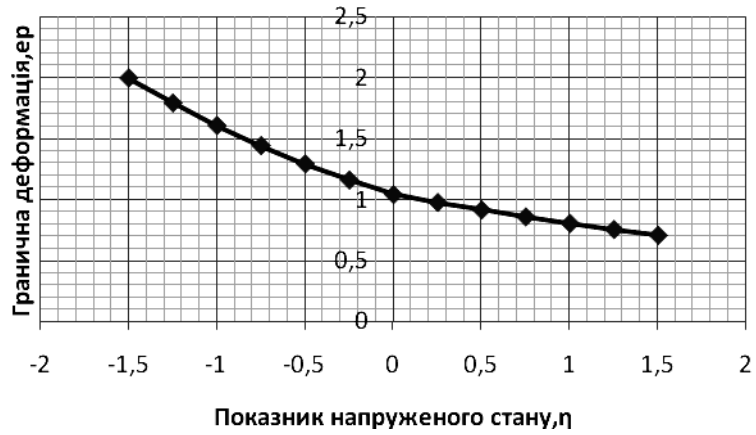


Рис. 4. Діаграма пластичності для сталі Ст3Гпс

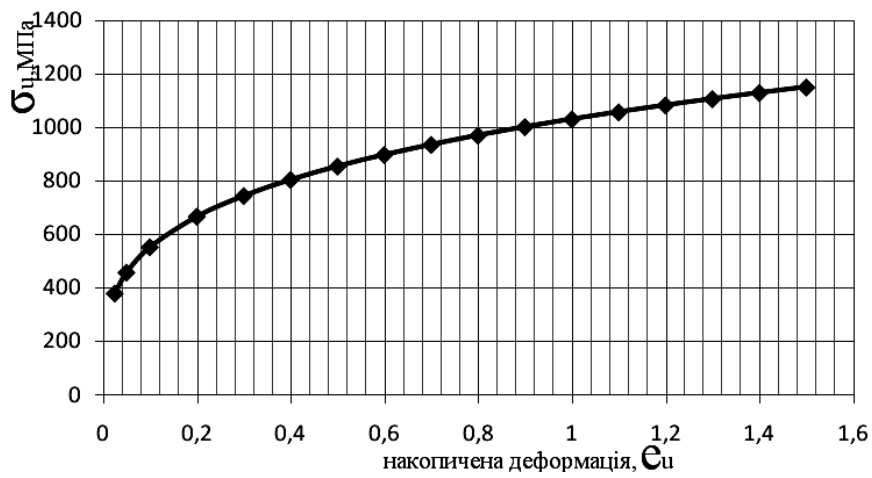


Рис. 5. Побудова кривої течії (апроксимація)

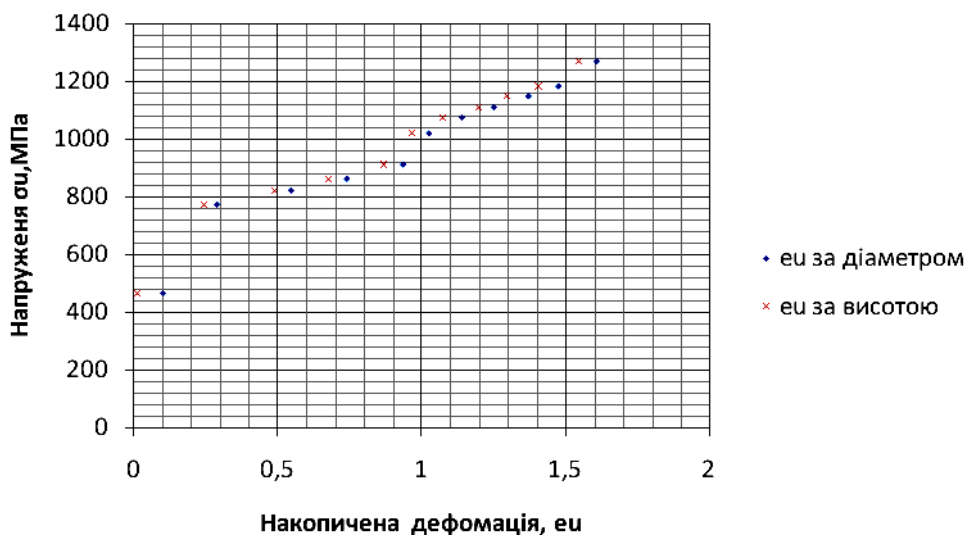


Рис. 6. Побудова кривої течії (дослідні дані) для сталі Ст3Гпс

Висновки

- Вивчення резерву пластичності матеріалу зі збереженням встановленої величини несучої здатності є однією з актуальніших задач при дослідженнях несучих металевих конструкцій у будівництві, зокрема арматурного прокату.
- Методи обробки експериментальних даних суттєво впливають на одержані результати.
- Існує неоднозначність визначення показника напруженого стану η при випробовуваннях на розтяг, що зумовлено різними наближеними розв'язками задач про напружений стан точок, що лежать у найменшому поперечному перерізі шийки зразка із ізотропного матеріалу.
- Існує вітчизняна школа дослідження апарату пластичності ізотропних матеріалів, яка надає можливість розвивати цей напрямок у будівельній галузі.
- Отримані дослідні дані слугуватимуть для подальшого вивчення ресурсу пластичності металу, яка надасть змогу зменшити масу конструкцій, що призведе до ефекту економії.
- Набуває особливої актуальності технологічна спадковість, або “пам'ять” матеріалу, яка може бути досліджена за допомогою вказаних методик.
- У зв'язку із загальною тенденцією до подорожчання металевого прокату подальше дослідження має особливу актуальність.

Використана література

1. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А. Огородников. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.
2. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников. – К.: Вища школа. Головное изд – во, 1983. – 175 с.
3. Огородников Виталий Антонович. Диаграммы пластичности и особенности их построения. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. праць / Огородников В.А., Кирица И.Ю., Музычук В.И. – Краматорськ, 2006. – С. 251-255. – ISBN 966-379-070-9.
4. Мандриков Александр Павлович. Примеры расчета металлических конструкций / А.П. Мандриков. – Учеб.пособие для техникумов.–2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991.– С. 28–29.
5. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови (ISO 6935-2:1991, NEQ) : ДСТУ 3760-2006. – [Чинний від 2007-10-1]. – К. : Держспоживстандарт України 2006. – 158 с. – (Національний стандарт України)
6. Кирица Инна Юрьевна. Оценка деформируемости заготовок при обратном выдавливании. Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах: Міжнар. науково – технічна конференція, (Вінниця, 29 травня – 1 червня 2006 р.) / Кирица И. Ю. – Вінниця, 2006. – С. 117–119.

Огородніков Віталій Антонович – д.т.н., професор, зав. кафедри опору матеріалів та прикладної механіки Вінницького національного технічного університету.

Бікс Юрій Семенович – магістрант Вінницького національного технічного університету.