

11. Марьяндышев П.А. Экспериментальное исследование процесса термической подготовки и воспламенения биотоплива / П.А. Марьяндышев, А.А. Чернов, Н.В. Шкаева, В.К. Любов // Международный

журнал экспериментального образования. – 2013. – № 11 – С. 71 – 76.

УДК 539.3

Сізова Н.Д., Гречко Н.В.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Вступ.** При роботі конструкцій різного призначення, зокрема, стержнів у результаті деформації може відбутися їх руйнування, яке викликано втратою стійкості, тобто втратою первісної форми. Втрата стійкості є найбільш складним видом руйнування конструкції. Для надійної роботи стержневої конструкції необхідно, щоб усі її елементи були стійкі: вони повинні при дії навантажень деформуватися в таких межах, щоб характер їх роботи залишався незмінним. Тому є актуальним перевірка конструкції на стійкість [1,2].

**Постановка задачі.** Математичне формулювання стійкості стержня представляється наступною розрахунковою схемою (рис. 1) і описується системою рівнянь

$$\begin{cases} -Ry'' = Py, & x \in (0, l), \\ y(0) = 0 \\ y(l) = 0 \end{cases} \text{ крайові умови,} \quad (1)$$

де  $R=EJ(x)$  – жорсткість балки,  $P$  і  $y(x) \neq 0$  підлягають визначенню, тобто необхідно знайти стиснену силу  $P$  на статично визначену балку, яка викликає згин стержня.

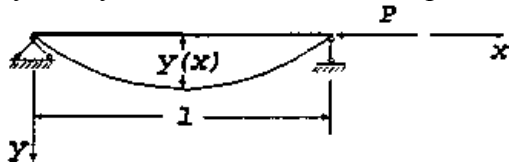


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення стійкості стержня

Відомо, що при будь-якому  $P$  прогин  $y(x)=0$  є розв'язком, величина  $P$ , при якій прогин  $y(x) \neq 0$ , носить назву критичної сили, а  $y(x)$  – є формою втрати стійкості.

Для задачі (1) величина  $P$  є власним значенням оператора крайової задачі, а  $y(x)$  – власною функцією цього оператора.

Аналітичний розв'язок даної задачі існує лише при  $R=const$ , в інших випадках задача розв'язується тільки чисельно, зокрема, методом кінцевих різниць.

За алгоритмом використання методу кінцевих різниць необхідно розбити відрізок  $(0, l)$  на  $n+1$  частину (рис.2) з величиною  $h=l/(n+1)$  – довжина відрізка розбиття (крок), де  $i=0, 1, \dots, n, n+1$  номери точок розбиття балки довжиною  $l$ ;  $x_i$  – координата  $i$ -ї точки розбиття;  $y_i = y(x_i)$  – значення функції в  $i$ -й точці,  $R_i = R(x_i)$ .

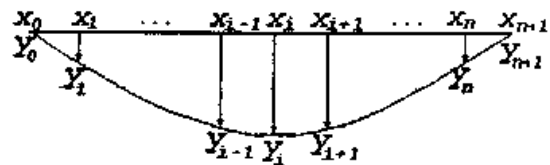


Рис. 2. Схема методу кінцевих різниць

Замінивши в формулі (1) другу похідну у внутрішніх точках відрізка:

$$y'' = y''(x_i) \approx \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2},$$

одержимо

$$-R_i \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} = Py_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

для граничних точок:

$$\begin{cases} y_0 = 0, \\ y_{n+1} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для внутрішніх точок балки з урахування множника  $h^2/R$  і крайових умов (3)

для кожного рівняння (2) створюється однорідна лінійна система рівнянь з  $n$  невідомими:

$$\begin{cases} 2y_1 - y_2 = P \cdot h^2 / R \cdot y_1, & i = 1, \\ -y_{i-1} + 2y_i - y_{i+1} = P \cdot h^2 / R \cdot y_i, & i = 2, 3, \dots, n-1, \\ -y_{n-1} + 2y_n = P \cdot h^2 / R \cdot y_n, & i = n \end{cases} \quad (4)$$

Відомо, що ненульове рішення такої системи існує тільки для деяких значень  $P=P_{hp}$ .

В матричному представленні така система має вигляд

$$Ay = PBu, \quad (5)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & & & & & & \\ -1 & 2 & -1 & & & & & \\ & -1 & 2 & -1 & & & & \\ & & \dots & \dots & \dots & & & \\ & & & \dots & \dots & \dots & & \\ & & & & & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & & & -1 & 2 & \end{bmatrix}, \quad (6)$$
$$B = h^2 \begin{bmatrix} 1/R_1 & & & & & & & & & \\ & 1/R_2 & & & & & & & & \\ & & \dots & & & & & & & \\ & & & \dots & & & & & & \\ & & & & \dots & & & & & \\ & & & & & & & & & 1/R_{n-1} \\ & & & & & & & & & 1/R_n \end{bmatrix}$$

Таким чином, задача зведена до визначення власних чисел і векторів матриці  $A^{-1}B$ . Тобто, кожне власне число  $P$  задачі (5) є критичною силою, а відповідний власний вектор  $y$  – формою втрати стійкості.

На практиці інтерес викликає мінімальна критична сила  $P_{min}$  і відповідна їй форма втрати стійкості. Вона може бути знайдена, якщо помножити матрицю (5) на  $(1/P)A^{-1}$ , звідки  $\tilde{A}y = \lambda y$ , де  $\tilde{A} = A^{-1}B$ ,  $\lambda = 1/P$ ,  $P_{min} = 1/\lambda_{min}$ .

Тобто для визначення мінімальної критичної сили достатньо обчислити максимальне власне число матриці  $\tilde{A}$ . Тоді алгоритм має такий вигляд:

- 1. задається  $v^{(0)}$  – довільний ненульовий вектор,
- 2. обчислюються величини

$$\lambda^{(k)} = \|v^{(k)}\|, \quad y^{(k)} = \frac{1}{\lambda^{(k)}} v^{(k)}, \quad v^{(k+1)} = A^{-1} B y^{(k)},$$

$k = 1, 2, \dots$ , доти, доки  $|\lambda^{(k)} - \lambda^{(k+1)}| < \epsilon$ .

$$\text{Тоді } P_{min} = \frac{1}{\lambda^{(k)}}, \quad y = y^{(k)}.$$

**Результати дослідження.** Наведений алгоритм можна реалізувати в одному з програмних пакетів, наприклад, Excel [3, 4], MathCad [5].

Для конкретних значень величин жорсткості і геометричних розмірів балки значення мінімальної критичної сили і форми втрати стійкості з використанням програмних пакетів EXCEL і MathCad подані на рис. 3, 4.

В тому випадку, коли досліджується стійкість стержня довільної форми, використання методу кінцевих різниць в пакетах Excel, MathCad викликає певні труднощі. В такому разі доцільно звертатися до існуючих спеціалізованих програмних комплексів [3-5], наприклад, ПК ЛІРА, що дозволяє автоматизувати обчислювальний процес, визначити критичну силу при різних параметрах завантаження, закріплення, розмірів і профілю конструкції.

У ПК ЛІРА розрахунок на стійкість припускає при знайденій з лінійного розрахунку розподіленій силі  $N$  визначити значення числового параметра  $\lambda_0$  такого, щоб при силі  $(\lambda_0 \cdot N)$  відбулася втрата стійкості [3-5].

У процесі розрахунку загальної стійкості ітераційним методом визначається значення  $\lambda$  таке, при якому хоча б один елемент діагоналі матриці жорсткості приймає значення нуль. Якщо  $\lambda \geq 1$ , то вважається, що схема стійка в даному завантаженні або при даній комбінації навантажень.

У результаті обчислюються коефіцієнти запасу стійкості  $\lambda_i$ , форма втрати стійкості (рис.5,а), коефіцієнти вільної довжини для стержневих елементів (рис. 5, б), виходячи з загальної стійкості (рис. 5, в). Також ПК ЛІРА дає можливість візуалізувати форму втрати стійкості (рис 7-9).

| A     | B         | C       | D             | E       | F                                | G       | H       | I       | J       | K       | L  | M |
|-------|-----------|---------|---------------|---------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----|---|
| N     | x         | R       | A=            | 2       | -1                               | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0  | 0 |
| 1     | 0.125     | 0.54688 |               | -1      | 2                                | -1      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0  |   |
| 2     | 0.25      | 0.9375  |               | 0       | -1                               | 2       | -1      | 0       | 0       | 0       | 0  |   |
| 3     | 0.375     | 1.17188 |               | 0       | 0                                | -1      | 2       | -1      | 0       | 0       | 0  |   |
| 4     | 0.5       | 1.25    |               | 0       | 0                                | 0       | -1      | 2       | -1      | 0       | 0  |   |
| 5     | 0.625     | 1.17188 |               | 0       | 0                                | 0       | 0       | -1      | 2       | -1      | 0  |   |
| 6     | 0.75      | 0.9375  |               | 0       | 0                                | 0       | 0       | 0       | -1      | 2       | -1 |   |
| 7     | 0.875     | 0.54688 |               | 0       | 0                                | 0       | 0       | 0       | 0       | -1      | 2  |   |
| h     |           |         | B=            | 0.02857 | 0                                | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0  | 0 |
| 0.125 |           |         |               | 0       | 0.01667                          | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0  | 0 |
|       |           |         |               | 0       | 0                                | 0.01333 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0  | 0 |
|       |           |         |               | 0       | 0                                | 0       | 0.0125  | 0       | 0       | 0       | 0  | 0 |
|       |           |         |               | 0       | 0                                | 0       | 0       | 0.01333 | 0       | 0       | 0  | 0 |
|       |           |         |               | 0       | 0                                | 0       | 0       | 0       | 0.01667 | 0       | 0  | 0 |
|       |           |         |               | 0       | 0                                | 0       | 0       | 0       | 0       | 0.02857 | 0  | 0 |
|       |           |         | A*(-1)=       | 0.875   | 0.75                             | 0.625   | 0.5     | 0.375   | 0.25    | 0.125   |    |   |
|       |           |         |               | 0.75    | 1.5                              | 1.25    | 1       | 0.75    | 0.5     | 0.25    |    |   |
|       |           |         |               | 0.625   | 1.25                             | 1.875   | 1.5     | 1.125   | 0.75    | 0.375   |    |   |
|       |           |         |               | 0.5     | 1                                | 1.5     | 2       | 1.5     | 1       | 0.5     |    |   |
|       |           |         |               | 0.375   | 0.75                             | 1.125   | 1.5     | 1.875   | 1.25    | 0.625   |    |   |
|       |           |         |               | 0.25    | 0.5                              | 0.75    | 1       | 1.25    | 1.5     | 0.75    |    |   |
|       |           |         |               | 0.125   | 0.25                             | 0.375   | 0.5     | 0.625   | 0.75    | 0.875   |    |   |
|       |           |         | A(~)=A*(-1)*B | 0.025   | 0.0125                           | 0.00833 | 0.00625 | 0.005   | 0.00417 | 0.00357 |    |   |
|       |           |         |               | 0.02143 | 0.025                            | 0.01667 | 0.0125  | 0.01    | 0.00833 | 0.00714 |    |   |
|       |           |         |               | 0.01786 | 0.02083                          | 0.025   | 0.01875 | 0.015   | 0.0125  | 0.01071 |    |   |
|       |           |         |               | 0.01429 | 0.01667                          | 0.02    | 0.025   | 0.02    | 0.01667 | 0.01429 |    |   |
|       |           |         |               | 0.01071 | 0.0125                           | 0.015   | 0.01975 | 0.025   | 0.02083 | 0.01786 |    |   |
|       |           |         |               | 0.00714 | 0.00833                          | 0.01    | 0.0125  | 0.01667 | 0.025   | 0.02143 |    |   |
|       |           |         |               | 0.00357 | 0.00417                          | 0.005   | 0.00625 | 0.00833 | 0.0125  | 0.025   |    |   |
|       |           |         | N             | Шаг №1  | Значения ячеек E36:E54 на шаге 2 |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 1 nu      |         | 1             | 0.0245  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 2         |         | 1             | 0.0382  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 3         |         | 1             | 0.0456  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 4         |         | 1             | 0.04797 |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 5         |         | 1             | 0.0456  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 6         |         | 1             | 0.0382  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 7         |         | 1             | 0.0245  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       |           |         | la            | 2.64575 | 0.10286                          |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 1 y=nu/la |         | 0.37796       | 0.2382  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 2         |         | 0.37796       | 0.37141 |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 3         |         | 0.37796       | 0.44337 |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 4         |         | 0.37796       | 0.46634 |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 5         |         | 0.37796       | 0.44337 |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 6         |         | 0.37796       | 0.37141 |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       | 7         |         | 0.37796       | 0.2382  |                                  |         |         |         |         |         |    |   |
|       |           |         | Pmin=         | 0.37796 | 9.7224                           |         |         |         |         |         |    |   |

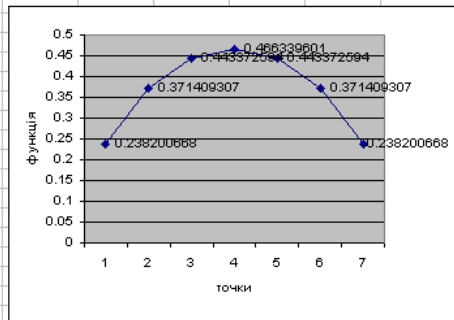


Рис. 3. Результат обчислення стійкості стержня в EXCEL

h = 0.125 i = 1..7

$$N_k = 1 \quad x_i = h \cdot N_i \quad R_k = 5 \cdot x_i (1 - x_i)$$

$$AA = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad AA2 = AA^{-1}$$

$$AA2 = \begin{pmatrix} 0.875 & 0.75 & 0.625 & 0.5 & 0.375 & 0.25 & 0.125 \\ 0.75 & 1.5 & 1.25 & 1 & 0.75 & 0.5 & 0.25 \\ 0.625 & 1.25 & 1.875 & 1.5 & 1.125 & 0.75 & 0.375 \\ 0.5 & 1 & 1.5 & 2 & 1.5 & 1 & 0.5 \\ 0.375 & 0.75 & 1.125 & 1.5 & 1.875 & 1.25 & 0.625 \\ 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 & 1.25 & 1.5 & 0.75 \\ 0.125 & 0.25 & 0.375 & 0.5 & 0.625 & 0.75 & 0.875 \end{pmatrix}$$

$$BB = \begin{pmatrix} 0.29 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.13 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.29 \end{pmatrix}$$

SA = eigenvals(AA)

SAMAX = max(SA)

SAMAX = 1.007

PPMIN =  $\frac{1}{SAMAX}$  PPMIN = 0.993

PKP = PPMIN \* 9.81

PKP = 9.742

$$AB = AA2 \cdot BB$$

$$SA = \begin{pmatrix} 1.007 \\ 0.337 \\ 0.169 \\ 0.1 \\ 0.068 \\ 0.047 \\ 0.036 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Результат обчислення стійкості стержня в MathCad

Балка\_2011\_20.Балка\_2011

Thu Jan 27 15:09:22 2011 БАЛКА\_201 основная схема

а) 1

ФОРМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

| 1   | 2         | 3          | 4          |
|-----|-----------|------------|------------|
| 2 - |           |            |            |
| X   |           | -725.34727 |            |
| Z   |           | 419.72217  | 1000.0000  |
| UY  | 12.617607 | -25.235213 | -113.63908 |
|     |           |            | -161.28436 |

Балка\_2011\_19.Балка\_2011

Thu Jan 27 15:12:48 2011 БАЛКА\_201

б) 1

КОЭФФИЦИЕНТЫ СВОБОДНЫХ ДЛИН

| 1     | 2     | 3     |
|-------|-------|-------|
| LY- 2 | 10.56 | 3.980 |

Балка\_2011\_18.Балка\_2011

Thu Jan 27 15:10:48 2011 БАЛКА\_201

в) 1

| Номер загрузки | Коэффициент запаса устойчивости | КОММЕНТАРИЙ |
|----------------|---------------------------------|-------------|
| 2              | 0.5243                          |             |

Интервал поиска коэффициентов запаса 0 - 1000.0000; точность 0.0000.

Рис. 5. Дані про параметри стійкості

Наведемо результати дослідження стійкості конструкції, яка складається з арки і підкріплюючих стержнів (рис. 6). Розглядаються три типи завантаження – зосереджена сила однакової величини в центрі арки і на підкріплюючих стержнях (рис. 6, а); на підкріплюючих стержнях (рис. 6, б); в центрі арки (рис. 6, в). Конструкція була шарнірно закріплена, профіль

конструкції – кільце, матеріал конструкції – залізобетон [6, 7].

На рис. 7-9 наведені форми втрати стійкості для конкретних геометричних і фізичних параметрів в кожному завантаженні, представлені три форми втрати стійкості для кожного завантаження.

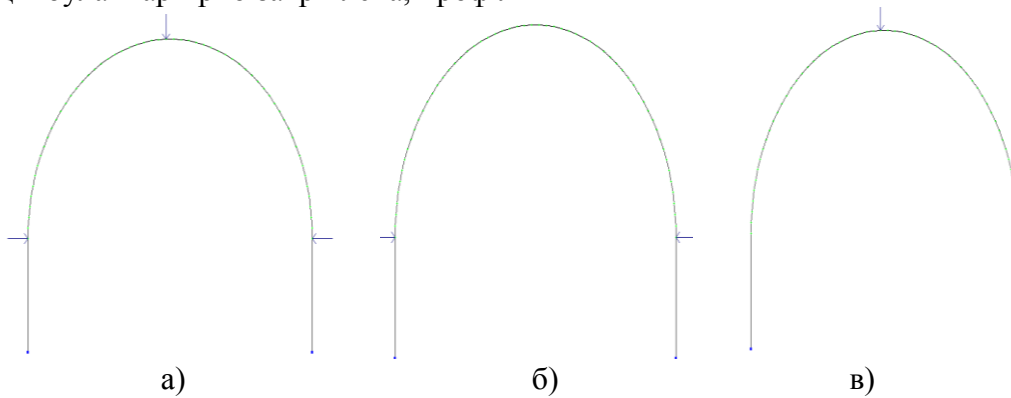


Рис. 6. Види завантажень стержневої конструкції

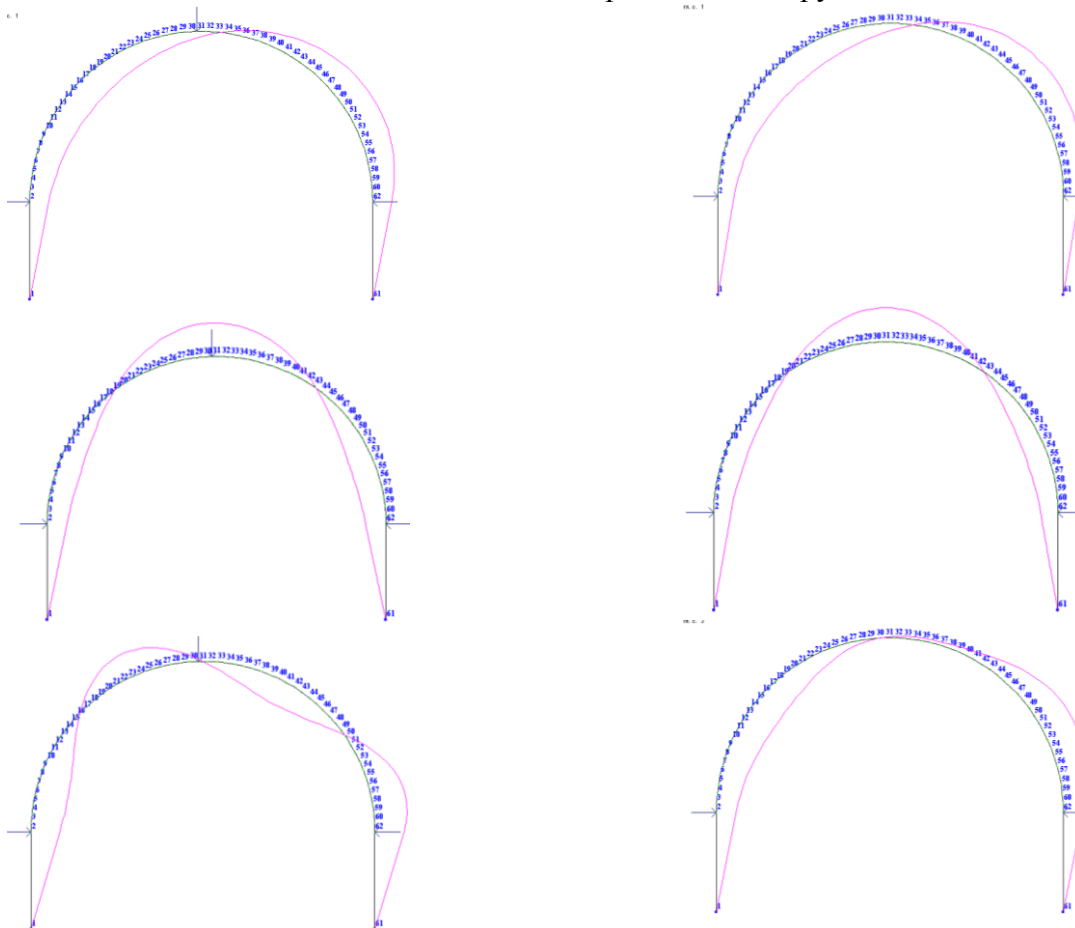


Рис. 7. Форми втрати стійкості у першому завантаженні

Рис. 8. Форми втрати стійкості у другому завантаженні

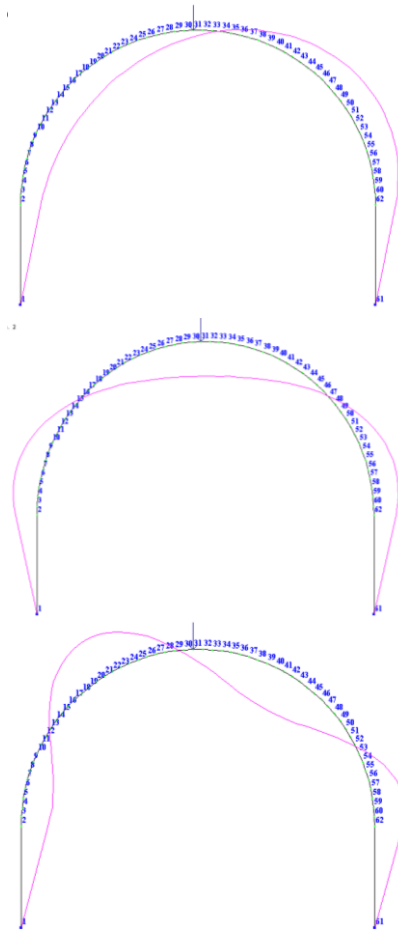


Рис. 9. Форми втрати стійкості у третьому завантаженні

В ПК ЛІРА одержані значення коефіцієнтів запасу стійкості для кожного завантаження (рис.10), коефіцієнти вільних довжин в кожній точці конструкції (рис. 11), значення критичних сил (табл. 1).

| Номер завантаження | Коефіцієнт запасу стійкості | КОММЕНТАРИЙ |
|--------------------|-----------------------------|-------------|
| 1                  | 0.0969                      |             |
| 2                  | 0.6764                      |             |
| 3                  | 0.1074                      |             |

Інтервал пошуку коефіцієнтів запасу 0 - 1000.0000; точність 0.0000.

Рис. 10. Значення коефіцієнтів запасу стійкості

Таблиця 1 – Значення критичних сил

| Сили                             | 1 завантаження | 2 завантаження | 3 завантаження |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Поздовжні сили N                 | -7,99843       | -4,4254        | -5,4000        |
| Поперечні сили Q <sub>z</sub>    | -6,00224       | -5,5574        | -5,03577       |
| Згинальний момент M <sub>y</sub> | -15,4635       | -22, 2288      | -8,76143       |

КОЕФІЦІЄНТИ СВОБОДНИХ ДЛИН

|       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LY- 1 | 159.0 | 50.56 | 49.14 | 47.89 | 46.80 | 45.84 | 45.00 | 44.26 | 43.62 | 43.06 |
| LY- 2 |       | 128.0 | 73.95 | 57.34 | 48.53 | 42.88 | 38.88 | 35.87 | 33.50 | 31.59 |
| LY- 3 | 151.0 | 48.56 | 48.21 | 47.93 | 47.73 | 47.59 | 47.53 | 47.53 | 47.60 | 47.73 |
|       | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| LY- 1 | 42.59 | 42.19 | 41.86 | 41.59 | 41.39 | 41.24 | 41.16 | 41.14 | 41.17 | 41.27 |
| LY- 2 | 30.01 | 28.68 | 27.55 | 26.58 | 25.74 | 25.01 | 24.37 | 23.81 | 23.31 | 22.88 |
| LY- 3 | 47.94 | 48.22 | 48.57 | 49.00 | 49.52 | 50.12 | 50.82 | 51.63 | 52.55 | 53.61 |
|       | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    |
| LY- 1 | 41.42 | 41.63 | 41.91 | 42.25 | 42.67 | 43.15 | 43.72 | 44.38 | 45.13 | 45.99 |
| LY- 2 | 22.50 | 22.17 | 21.89 | 21.64 | 21.44 | 21.27 | 21.13 | 21.02 | 20.95 | 20.90 |
| LY- 3 | 54.80 | 56.17 | 57.74 | 59.52 | 61.58 | 63.97 | 66.76 | 70.06 | 74.02 | 78.86 |
|       | 31    | 32    | 33    | 34    | 35    | 36    | 37    | 38    | 39    | 40    |
| LY- 1 | 46.98 | 46.05 | 45.23 | 44.52 | 43.90 | 43.36 | 42.91 | 42.52 | 42.21 | 41.96 |
| LY- 2 | 20.89 | 20.90 | 20.95 | 21.02 | 21.13 | 21.27 | 21.44 | 21.64 | 21.89 | 22.17 |
| LY- 3 | 84.94 | 79.15 | 74.49 | 70.66 | 67.46 | 64.73 | 62.40 | 60.38 | 58.62 | 57.08 |
|       | 41    | 42    | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    | 49    | 50    |
| LY- 1 | 41.78 | 41.65 | 41.59 | 41.58 | 41.64 | 41.75 | 41.92 | 42.16 | 42.46 | 42.83 |
| LY- 2 | 22.50 | 22.88 | 23.31 | 23.81 | 24.37 | 25.01 | 25.74 | 26.58 | 27.55 | 28.68 |
| LY- 3 | 55.74 | 54.56 | 53.52 | 52.62 | 51.82 | 51.14 | 50.55 | 50.05 | 49.63 | 49.29 |

Рис. 11. Значення коефіцієнтів вільних довжин в кожній точці конструкції

**Висновки.** З використанням ПК ЛІРА в автоматизованому режимі досліджується стійкість конструкцій довільної геометричної форми для різних типів навантаження і фізичних параметрів. Обчислюються коефіцієнти запасу стійкості, коефіцієнти вільних довжин в кожній точці конструкції, значення критичних сил, виводяться форми стійкості. Аналіз результатів дозволяє на етапі обчислювального експерименту обрати необхідні для експлуатації робочі параметри конструкції, не вдаючись до натурних експериментів, що суттєво впливає на час обґрунтування вибору її параметрів роботи.

ЛІТЕРАТУРА:

- Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Физ.-мат. из., 1985. – 860 с.
- Мсахалая Ж.И. Основы современных информационных технологий. – М.: Наука, 2003.– 189 с.
- Городецкий А.С., Шмуклер А.В., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003 – 889 с.
- Новожилова М.В., Сізова Н.Д., Петрова О.О., Гречко Н.В. MS EXCEL 2010. Лабораторний практикум. Ч.1 Обробка і аналіз даних: Навчальний посібник. – Х.:ХНУБА, 2014. – 180 с.
- Сізова Н.Д., Петрова О.О., Гречко Н.В. Вбудовані функції MathCad для розв'язання математичних задач будівельної тематики:.– Х.: ХДТУБА, 2010.– 96 с.

6. Барабаш М.С., Гензерский Ю.В., Марченко Д.В., Титок В.П. Лира 9.2. Примеры расчета и проектирования.– Киев: Факт, 2005.–106 с.

7. Сізова Н.Д., Гречко Н.В. Автоматизоване проектування конструкцій стержневих систем в ПК ЛПА: Навчально-методичний посібник. – Харків: ХДТУБА, 2011.– 108 с.

УДК 621.793.7

**Глушкова Б.Д., Тарабанова В.П., Белый В.А.**  
*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ Ti-Mo-N НА НАНОТВЕРДОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ**

### **Введение**

Значительное место в производстве различного назначения деталей занимает изготовление поршневых колец, основной причиной выхода из строя которых является изнашивание рабочих поверхностей. Поэтому большое внимание уделяется проблемам повышения износостойкости поверхностей пар трения поршневых колец.

Создание в одном материале сочетания высокой твердости с высокой пластичностью практически невозможно в однокомпонентном или многокомпонентном сплаве, но реально в гетерогенном сплаве.

Актуальной представляется проблема разработки метода повышения износостойкости поршневых колец.

### **Анализ публикаций**

Как указано в работе [1], износостойкость металла определяется сочетанием структуры и ряда свойств, а именно высокой твердости и пластичности при отсутствии хрупкости, устойчивости механических свойств в условиях работы на износ, высокой насыщенности и равномерности распределения легирующих элементов.

В работе [2] установлено, что интенсивность протекания релаксационных процессов при трении существенно влияет на износостойкость.

В последнее время для улучшения эксплуатационных характеристик материалов широко применяется обработка поверхности высокоинтенсивными источниками энергии, взаимодействие которых с материалами приводит к прохождению

процессов, связанных с изменением структуры.

Прежде всего происходит изменение параметра кристаллической решетки, формируются дислокационные структуры, образуются ультрадисперсные фазы.

Результатом таких процессов является возникновение в поверхностных слоях материала остаточных внутренних напряжений. Методам определения и изучения природы формирования остаточных напряжений в покрытиях, полученных при вакуумно-дуговом осаждении, посвящен ряд работ [3, 4].

Цель настоящей работы – исследование многослойного наноструктурного покрытия, наносимого на поверхность поршневых колец для повышения их износостойкости.

### **Материал и методика исследования**

Материалом, на который наносилось многослойное покрытие вакуумно-дуговым методом, был серый чугун, широко применяемый в различных отраслях машиностроения.

Как известно, серый чугун имеет хорошие литейные и антифрикционные свойства, не чувствителен к дефектам поверхности, хорошо гасит вибрации.

Химический состав серого чугуна приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав серого чугуна

| Содержание элементов, % |      |      |      |      |      |           |
|-------------------------|------|------|------|------|------|-----------|
| C                       | Si   | Mn   | Ni   | S    | P    | Fe        |
| 3,49                    | 2,49 | 0,56 | 0,08 | 0,06 | 0,11 | остальное |