

ТЕХНОГЕННА ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 621.81:672.1:[620.173.26]

*В.М. Кондель, канд. техн. наук, доцент, Ю.О. Шевченко, Д.О. Лобода
(Полтавський національний педагогічний університет імені В.Г. Короленка)*

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПОЗДОВЖНЬОГО ЗГИНАННЯ З УРАХУВАННЯМ МІЦНОСТІ СТАЛІ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ

Втрата стійкості є дуже небезпечним явищем через некерований ріст деформацій і практично миттєве руйнування елементів конструкцій та деталей машин. Розрахунок допустимих навантажень і напружень на стиснуті елементи виконується за допомогою коефіцієнтів поздовжнього згинання.

Для запобігання надзвичайним ситуаціям автори провели дослідження стійкості сталених стиснутих елементів конструкцій та деталей машин, проаналізували експериментальні дані про роботу цих елементів та теоретичних розробок щодо їх розрахунків, побудували графіки коефіцієнтів поздовжнього згинання та запропонували формули для визначення цих коефіцієнтів залежно від міцності сталі.

Ключові слова: стиснуті елементи, коефіцієнт поздовжнього згину, міцність сталі.

В.Н. Кондель, Ю.О. Шевченко, Д.А. Лобода

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА С УЧЕТОМ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Потеря устойчивости – это очень опасное явление из-за неуправляемого роста деформаций и практически мгновенного разрушения элементов конструкций и деталей машин. Расчет допустимых нагрузок и напряжений на сжатые элементы выполняется с помощью коэффициентов продольного изгиба.

Для предупреждения чрезвычайных ситуаций авторы провели исследование устойчивости стальных сжатых элементов конструкций и деталей машин, проанализировали экспериментальные данные о работе этих элементов и теоретических разработок относительно их расчетов, построили графики коэффициентов продольного изгиба и предложили формулы для определения этих коэффициентов в зависимости от прочности стали.

Ключевые слова: сжатые элементы, коэффициент продольного изгиба, прочность стали.

V. Kondel', Yu. Shevchenko, D. Loboda

THE INVESTIGATION OF STRESS REDUCTION FACTORS WITH ACCOUNTANCE OF STEEL STRENGTH FOR PREVENTION OF EMERGENCY SITUATIONS

Buckling is a very dangerous phenomenon because of uncontrolled growth of deformations and almost instantaneous destruction of structures and parts of machines. The calculation of allowable loads and stresses on the compressed members is performed by using stress reduction factors.

The authors research the stability of compressed structures and parts of machines for prevention of emergency situations. The analysis of experimental and theoretical data of the behaviour of compressed structures and their members is provided. The new approaches to the stress reduction factors tests with accountance of steel strength are described.

Key words: compressed members, stress reduction factor, steel strength.

Постановка проблеми. Щоденно засоби масової інформації повідомляють про надзвичайні події, внаслідок яких відбувається порушення нормальних умов життя і діяльності людей і які можуть призвести або призводять до загибелі людей та значних матеріальних втрат. Найчастіше вони виникають через аварії та катастрофи, основною причиною яких є людський фактор, щодня гинуть сотні людей через недбалість та прорахунки фахівців. Іноді аварії та катастрофи відбуваються через руйнування конструкцій, елементів машин та споруд, які за певних умов досягли свого граничного стану, що не було враховано у їх розрахунках і проектуванні, як це сталося 21 листопада 2013 року у Ризі, де в мікрорайоні Золітуде зруйнувалися стіни і дах торговельного центру «Махіта», внаслідок чого загинули десятки людей, в тому числі, троє рятувальників.

Протягом всього терміну експлуатації елементи конструкцій та деталей машин зазнають різних пошкоджень, природа яких залежить від їх напружено-деформованого стану та умов роботи (розтяг або стиск, згинання, кручення, згинання з крученням, високі та низькі температури, змінне навантаження, агресивне середовище, радіаційне опромінення тощо). Для забезпечення міцності, надійності та довговічності цих елементів вчені багатьох країн світу проводять численні дослідження процесів накопичення пошкоджень, зокрема, зародження та розвиток тріщин в матеріалах, з яких вони виготовлені. Одним з основних напрямків запобігання цим негативним явищам або зменшення їх впливу на експлуатацію конструкцій в цілому є ретельне дослідження роботи елементів конструкцій та деталей машин з урахуванням властивостей їх матеріалів.

Відомо, що гарантією надійності конструкцій, елементів машин та споруд є задоволення умов їх міцності, жорсткості та стійкості, інженерні методи розрахунків яких розглядає опір матеріалів. Особливу увагу слід звернути на явище втрати стійкості, яке є дуже небезпечним і може призвести до трагічних наслідків, оскільки в цьому випадку відбувається некерований ріст деформацій і конструкція руйнується практично миттєво, що виключає будь-яку можливість вжиття дієвих заходів щодо запобігання аваріям та катастрофам [1, 2]. Втрата стійкості може відбуватися в елементах конструкцій та деталей машин, які працюють на стиск: колони, стійки, верхні пояси ферм, штоки парових машин та поршневі насосів, гвинти в передачах гвинт-гайка, циліндричні та конічні гвинтові пружини, різальні інструменти для обробки отворів (свердла, зенкери, розвертки, мітчики) на свердлильних верстатах, голки у швейних машинах та інші [2-4]. Саме тому одним з найважливіших напрямків запобігання надзвичайних ситуацій є дослідження допустимих напружень і навантажень на стиснуті елементи конструкцій та ретельне виконання всіх організаційних заходів щодо недопущення подібних аварій та катастроф в майбутньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вагомий внесок у вирішення проблеми стійкості стиснутих елементів конструкцій та деталей машин внесли видатні вчені XVIII-XX століть Л. Ейлер, Ф. Енгессер, Ф. Ясинський, Л. Тетмайер, Т. Карман, Ф. Шенлі та інші [1-4]. Вони запропонували формули для визначення критичної сили і напруження, які є небезпечними для стиснутого стержня, залежно від його гнучкості, матеріалу, способів закріплення кінців, схеми та виду навантаження, а також умову стійкості з коефіцієнтом поздовжнього згину φ :

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq [\sigma]_{st} = \varphi[\sigma], \quad (1)$$

де σ та $[\sigma]$ – робоче та основне допустиме напруження; $[\sigma]_{st}$ – допустиме або безпечне напруження на стійкість, F – робоча поздовжня сила; A – площа поперечного перерізу стиснутого стержня.

Формула (1) дуже часто використовується на практиці при розрахунках елементів на стійкість, зокрема, для визначення допустимих напружень і навантажень, тому дослідження коефіцієнтів зменшення основного допустимого напруження або коефіцієнтів поздовжнього згину φ для стиснутих елементів конструкцій та деталей машин є актуальним.

Досліди показали, що коефіцієнт φ залежить від гнучкості елемента λ , тобто $\varphi = f(\lambda)$. В свою чергу,

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}, \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт зведення довжини стержня, який залежить від способу закріплення його кінців (рис. 1); l – довжина стержня; $i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}}$ – мінімальний радіус інерції; I_{\min} – мінімальний момент інерції [2].

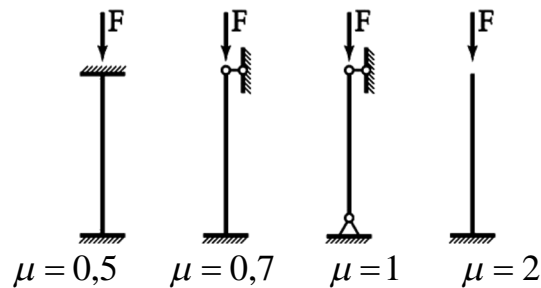


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнтів μ від способу закріплення кінців стержня

Останні дослідження [2, 5] показали, що гнучкість стиснутих елементів λ залежить не лише від вищезгаданих чинників, але й від жорсткості опор, що було враховано авторами при розрахунках коефіцієнта зведення довжини стержня μ [5]. Слід також зазначити, що формула (2) для розрахунків гнучкості була використана при проектуванні раціональних складених перерізів стиснутих елементів конструкцій та деталей машин [6].

За результатами експериментальних даних вчені багатьох країн світу одержали значення коефіцієнтів поздовжнього згину φ для стійок, виготовлених з різних матеріалів: сталей різних марок та марки, чавуну, алюмінієвих сплавів, деревини (сосна, ялина), кам'яних та армокам'яних елементів, бетонних та залізобетонних конструкцій, представлених у вигляді таблиць [2-4]. Свого часу вчені запропонували залежності $\varphi = f(\lambda)$ для деревини і сталі [2, 7-9], які складаються з двох або трьох різних рівнянь [2, 7, 8], або які стосуються лише сталі марки Ст 3 [9], тому для практичних розрахунків стиснутих елементів слід вивести одне рівняння, враховуючи властивості матеріалів, з яких виготовлені ці елементи.

Постановка завдання. Оскільки переважна більшість стиснутих елементів конструкцій та деталей машин виготовляється із сталі різної міцності, виведемо формулу для визначення коефіцієнтів поздовжнього згину φ саме для сталевих зразків.

Виклад основного матеріалу. Існують залежності коефіцієнта φ від розрахункового опору сталі R_y і умовної гнучкості стержня $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y/E}$, де E – модуль Юнга або модуль пружності першого роду для сталі [7]:

$$\varphi = 1 - \left(0,073 - 5,53 \frac{R_y}{E} \right) \bar{\lambda} \sqrt{\bar{\lambda}} \quad \text{при } 0 < \bar{\lambda} \leq 2,5; \quad (3)$$

$$\varphi = 1,47 - 13 \frac{R_y}{E} - \left(0,371 - 27,3 \frac{R_y}{E} \right) \bar{\lambda} + \left(0,0275 - 5,53 \frac{R_y}{E} \right) \bar{\lambda}^2 \quad \text{при } 2,5 < \bar{\lambda} \leq 4,5; \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{332}{\bar{\lambda}^2 (51 - \bar{\lambda})} \quad \text{при } \bar{\lambda} > 4,5. \quad (5)$$

Є інші пропозиції щодо визначення коефіцієнта φ , зокрема, прості рівняння для низькоміцних та високоміцних сталей [8]:

$$\varphi = \frac{1}{(0,01\lambda)^2 + 1} \quad \text{та} \quad \varphi = \frac{1}{\left[\frac{\lambda}{100} \left(c - \frac{d}{R_y} \right) \right]^2 + 1}, \quad (6)$$

де коефіцієнти c і d відповідно дорівнюють: при $\lambda \leq 50$ $c=1,51$, $d=142$; а при $\lambda \geq 50$ $c=2,21$, $d=306$.

Для оцінки вищезгаданих формул і оцінки точності розрахунків коефіцієнтів поздовжнього згинання φ використаємо табличні дані експериментів [2-4] для зразків, виготовлених з різних матеріалів, зокрема, для сталей різної міцності, і побудуємо відповідні графіки залежностей $\varphi = f(\lambda)$ (рис. 2-4).

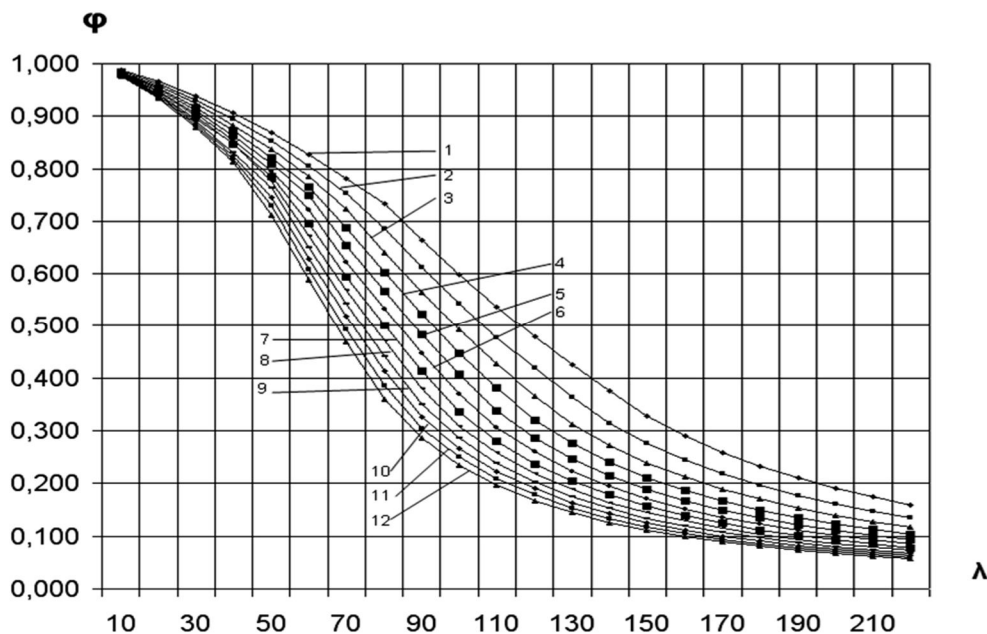


Рисунок 2 – Залежності $\varphi = f(\lambda)$ для стиснутих елементів з різним розрахунковим опором сталі R_y : 1 – 200 МПа; 2 – 240 МПа; 3 – 280 МПа; 4 – 320 МПа; 5 – 360 МПа; 6 – 400 МПа; 7 – 440 МПа; 8 – 480 МПа; 9 – 520 МПа; 10 – 560 МПа; 11 – 600 МПа; 12 – 640 МПа

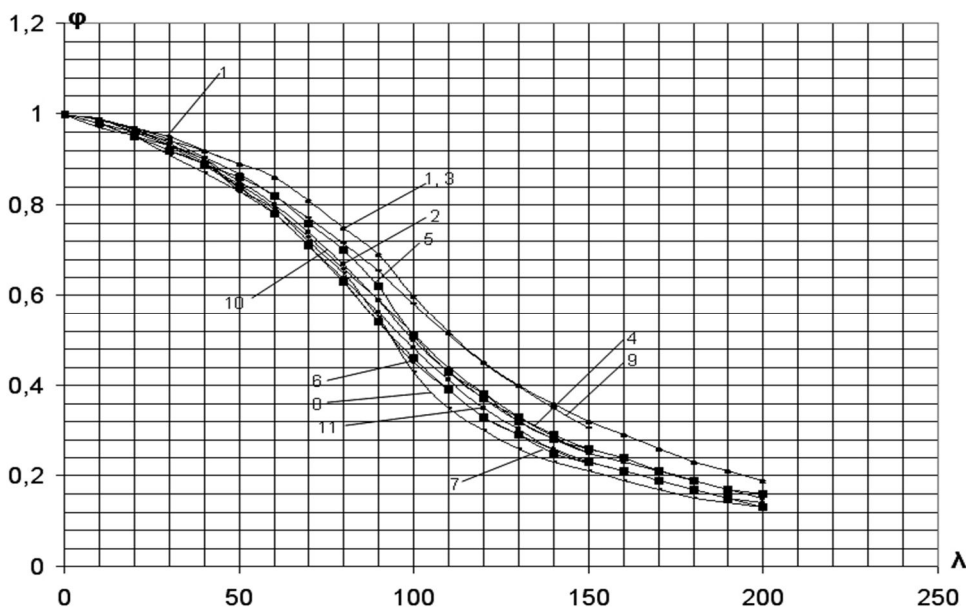


Рисунок 3 – Залежності $\varphi = f(\lambda)$ для стиснутих елементів, виготовлених з різних марок сталей: 1 – Ст 2, Ст 3, Ст 4; 2 – Ст 5; 3 – Сталь 20, 30, 40; 4 – Сталь 50; 5 – НЛ-1; 6 – НЛ-2; 7 – 14 Г2, 15 ГС, 10Г2С, 15ХСНД; 8 – СПК; 9 – С-38/23; 10 – С-44/29; 11 – С-46/33

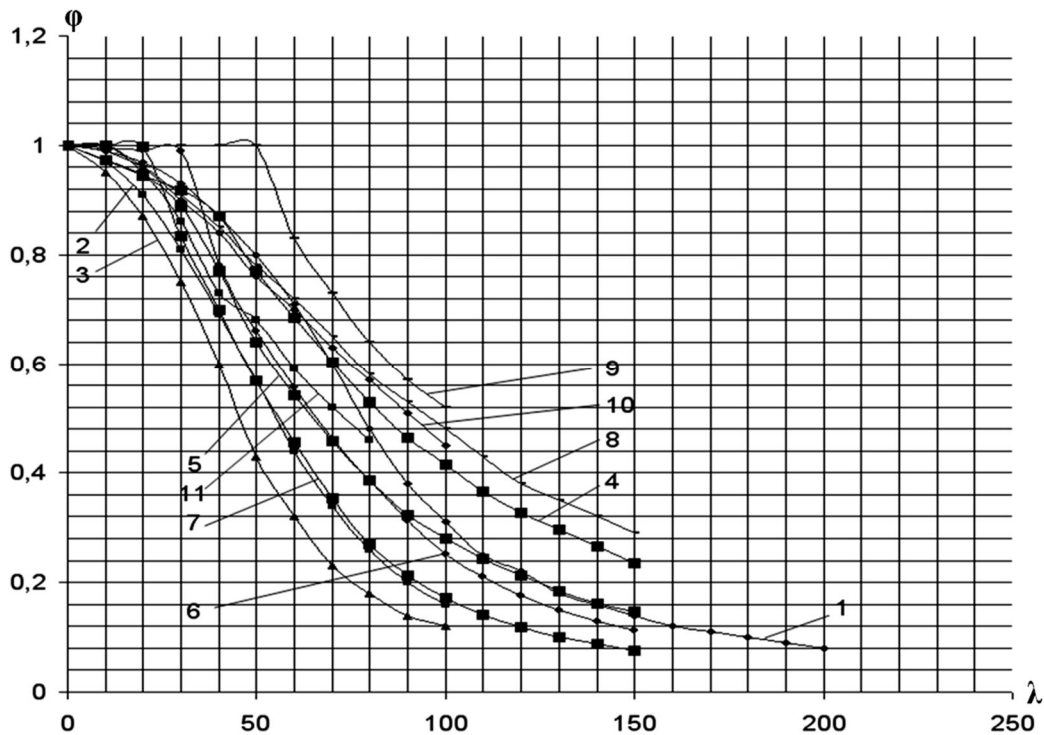


Рисунок 4 – Залежності $\varphi = f(\lambda)$ для стиснутих елементів, виготовлених з різних матеріалів:

1 – деревина (сосна, ялина); 2 – чавуни СЧ 12-28, СЧ 15-18, СЧ 15-30, СЧ 15-32, СЧ 15-36, СЧ 18-36, СЧ 21-40; 3 – чавуни СЧ 21-44, СЧ 24-44, СЧ 28-48; алюмінієві сплави: 4 – АМг1, АМг2, АМг3, АМг4, АМг5; 5 – АМг6; 6 – АВТ1; 7 – ДІ6Т; 8 – кам'яні та армокам'яні елементи; 9 – залізобетон; бетон: 10 – важкий; 11 – легкий

Для аналізу залежності коефіцієнта φ від міцності сталі за дослідними даними [3, 4] будемо ще графік функції $\varphi = f(R_y)$, де R_y – розрахунковий опір сталі (рис. 5). Очевидно, що коефіцієнт поздовжнього згину φ залежить не тільки від гнучкості стержня λ , але й від міцності матеріалу, з якого він виготовлений. Зокрема, для сталі з підвищенням її міцності (рис. 5) та зростанням гнучкості (рис. 2) коефіцієнт φ зменшується, тому для практичних розрахунків виведемо формулу для визначення коефіцієнта поздовжнього згину з урахуванням його залежності від цих чинників.

Нами було проведено дослідження точності розрахунків коефіцієнтів поздовжнього згину φ відповідно за формулами (3)-(5) і (6) з порівнянням експериментальних φ^{exp} і теоретичних φ^{th} значень цих коефіцієнтів і визначенням середніх арифметичних δ_m і середніх квадратичних σ_m похибок. Очевидно, що рівняння (6) більш зручні для розрахунків коефіцієнтів поздовжнього згину φ , ніж громіздкі формули (3)-(5), але останні дають змогу значно точніше визначити коефіцієнти φ (похибки становлять $\delta_m = 1,91\%$ і $\sigma_m = 2,20\%$), в той час, як за формулами (6) – відповідно $\delta_m = 8,26\%$ і $\sigma_m = 10,32\%$. Це означає, що необхідно скласти одне рівняння, яке б враховувало властивості як низькоміцних, так і високоміцних сталей і мало б прийнятні для практичних розрахунків показники точності (до 5%).

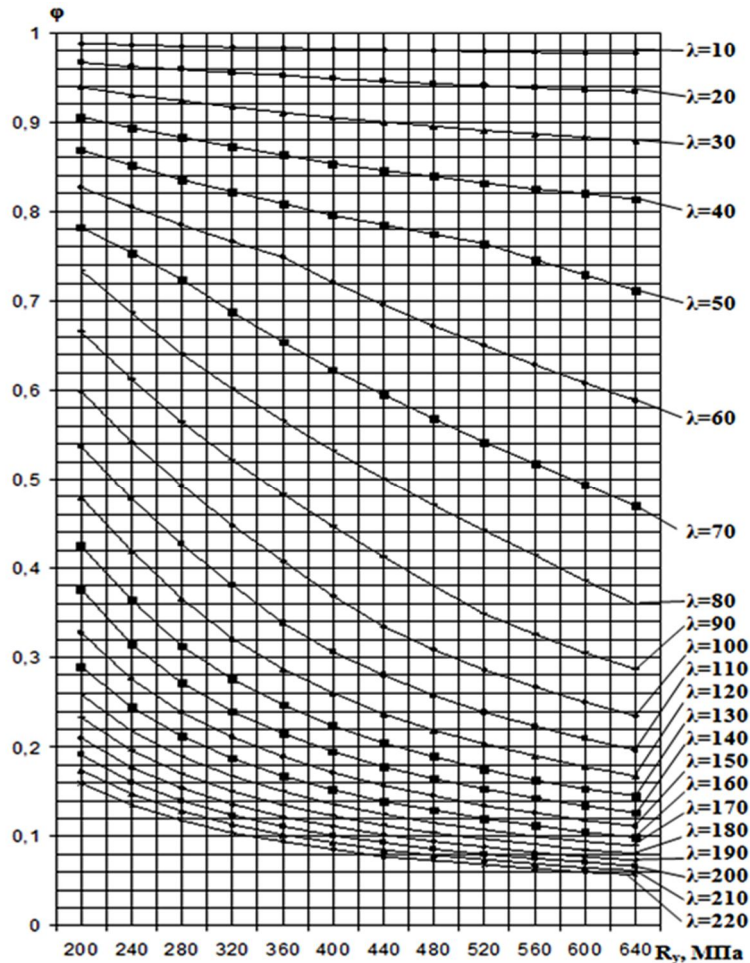


Рисунок 5 – Залежності $\varphi = f(R_y)$ для стиснутих сталевих елементів з різними гнучкостями λ

Аналіз діаграм (рис. 2) для сталевих стиснутих стійок показав, що графіки функції $\varphi = f(\lambda)$ подібні до кривої $x^2 y = 4a^2(2a - y)$, яка називається локном Аньезі [10]. Для цієї кривої при $x = 0$ $y = 2a$. В свою чергу, при $\lambda = 0$ $\varphi = 1$. Замінивши x на λ , а y на φ , визначаємо $a = 0,5$ і отримуємо рівняння $y = 1/(x^2 + 1)$. Враховуючи різну кривину графіків $\varphi = f(\lambda)$ для низькоміцних і високоміцних сталей (рис. 2), маємо залежність

$$\varphi = \frac{1}{(a\lambda^2 + b\lambda + c)^2 + 1}, \quad (7)$$

де a, b і c – коефіцієнти, які залежать від розрахункового опору сталі R_y :

$$(a, b, c) = k_0 + k_1 R_y + k_2 R_y^2, \quad (8)$$

де k_0, k_1 і k_2 – параметри, які враховують міцність сталі і визначаються за допомогою методу найменших квадратів; R_y – розрахунковий опір сталі в МПа. Значення параметрів k_0, k_1 і k_2 та їх розмірності наведено в наступній таблиці.

Значення параметрів k_0, k_1 і k_2

Коефіцієнти	Параметри		
	k_0	$k_1, \text{МПа}^{-1}$	$k_2, \text{МПа}^{-2}$
a	0,00236	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$-3,27 \cdot 10^{-8}$
b	-0,00238	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$-1,43 \cdot 10^{-8}$
c	0,217	$-9,83 \cdot 10^{-4}$	$4,44 \cdot 10^{-7}$

Для оцінки точності складеного нами рівняння (7) були проведені додаткові розрахунки теоретичних значень коефіцієнтів поздовжнього згинання φ^{th} для сталених стійок у діапазонах гнучкостей стиснутих елементів від 10 до 220 і розрахункових опорів сталі від 200 до 640 МПа. Порівняння теоретичних значень φ^{th} з експериментальними даними φ^{exp} [2-4] свідчать про достатню для практичних розрахунків точність запропонованої нами формули (7): середні значення відхилень складають $\delta_m = 3,69\%$ і $\sigma_m = 4,51\%$.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Для попередження надзвичайних ситуацій, які можуть виникнути при експлуатації стиснутих елементів конструкцій та деталей машин, проведено дослідження коефіцієнтів поздовжнього згинання φ для стійок, виготовлених з різних матеріалів, з побудовою відповідних графіків.

Встановлено, що коефіцієнт φ , який використовується для визначення допустимих або безпечних напружень і навантажень на стиснуті елементи, залежить не тільки від гнучкості стержня λ , але й від міцності матеріалу, з якого він виготовлений. Зокрема, для сталі з підвищенням її міцності та зростанням гнучкості коефіцієнт φ зменшується, на що слід звернути увагу при проектуванні стійок з високоміцних сталей.

Запропонована нами формула (7) враховує гнучкість стержня λ і міцність матеріалу, з якого він виготовлений, має достатню для практичних розрахунків точність, тому рекомендується для визначення коефіцієнтів поздовжнього згину φ .

Аналогічні дослідження слід провести для стиснутих елементів, виготовлених з інших матеріалів: чавуну, алюмінієвих сплавів, деревини, каменю, бетону, залізобетону тощо. Ці розробки дають підвищити надійність та довговічність елементів конструкцій та деталей машин і запобігти багатьом аваріям і катастрофам в майбутньому.

Список літератури:

1. Барданов Ю. М. Курс сопротивления материалов в структурно-логических схемах / Ю. М. Барданов. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1988. – 215 с.
2. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев; отв. ред. Г. С. Писаренко. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.
3. Лихтарников Я. М. Расчет стальных конструкций: справочное пособие [2-е изд., перераб. и доп.] / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков – Киев: Будівельник, 1984. – 368 с.
4. Васильченко В. Т. Справочник конструктора металлических конструкций / В. Т. Васильченко, А. Н. Рутман, Е. П. Лукьяненко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – К.: Будівельник, 1990. – 312 с.
5. Кондель В. Дослідження стійкості сталених стиснених елементів конструкцій з урахуванням умов їх закріплення та жорсткості опор / В. Кондель, А. Павліченко // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2011. – Т. 16. – № 4. – С. 18 – 27.
6. Кондель В. М. Дослідження раціональних перерізів стиснутих елементів конструкцій та деталей машин / В. М. Кондель, М. М. Шевчук, Р. Т. Холодков // Технічні науки : Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2013. – № 2 (65). – С. 29 – 35.
7. Справочник по расчету строительных конструкций на программируемых микрокалькуляторах / А. Я. Барашиков, М. Г. Гольдберг, Ю. Н. Кушнарв и др.; под ред. А. Я. Барашикова и В. А. Пермякова. – Киев: Будівельник, 1989. – 224 с.
8. Кондель В. М. Дослідження стійкості сталених стиснутих елементів сталого та змінного поперечних перерізів / В. М. Кондель, А. І. Павліченко // Фізико-математичні науки : Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: КНУ, 2011. – № 4. – С. 76 – 79.

9. Кондель В. М. Дослідження стійкості елементів конструкцій та деталей машин раціональних складених перерізів / В. М. Кондель, Р. Т. Холодков, М. М. Шевчук // *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету* : збірник наукових трудов. – Випуск 68. – 2015.– С. 50 – 56.

10. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; под общей ред. И. Г. Арамановича. – 4-е изд. – Москва: Наука, 1978. – 832 с.

References:

1. Bardanov, Yu. M. (1988). *The course of strength of materials in structural-logic schemes*. Kyiv: Vyshcha Shkola (in Russ.).
2. Pisarenko, H. S., Yakovlev, A. P., Matveyev, V. V. (1988). In H. S. Pisarenko (Ed.). *Handbook on strength of materials*. Kyiv: Naukova Dumka (in Russ.).
3. Likhtarnikov, Ya. M., Ladyzhenskiy, D. V., Klykov, V. M. (1984). *Design of steel structures. Handbook*. Kyiv: Budivel'nyk (in Russ.).
4. Vasil'chenko, V. T., Rutman, A. N., Luk'yanenko, Ye. P. (1990). *The reference design of metal structures*. Kyiv: Budivel'nyk (in Russ.).
5. Kondel', V. M., & Pavlichenko, A. I. (2011). The investigation of stability of compressed steel members with accountance of fixing conditions and stiffness supports. *Bulletin of Ternopil Ivan Puluj National Technical University, vol. 16, 4*, 18-27 (in Ukr.).
6. Kondel', V. M., Kholodkov, R. T., Shevchuk, M. M. (2013). The investigation of rational sections of compressed steel structures and parts of machines. *Visnyk of Chernihiv State Technological University, Series "Technical Sciences", 2 (65)*, 29-35 (in Ukr.).
7. Barashykov, A. Ya., Gol'dberh, M., H., Kushnarev, Yu. N. et al. (1989). In A. Ya. Barashykov & V. A. Permiakov (Ed.). *Reference for calculation of building structures on programmable calculators*. Kyiv: Budivel'nyk (in Russ.).
8. Kondel', V. M., & Pavlichenko, A. I. (2011). The stability investigation of compressed steel members of constant and variable cross sections. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Series Physics & Mathematics, issue 4*, 76-79 (in Ukr.).
9. Kondel', V. M., Kholodkov, R. T., Shevchuk, M. M. (2015). The investigation of stability for structures and parts of machines of rational composite sections. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, issue 68*, 50-56 (in Ukr.).
10. Korn, G., & Korn, T. (1978). In I. H. Aramanovich (Ed.). *Mathematical handbook for scientists and engineers*. Moscow: Nauka (in Russ.).

