



Doi: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v21i3.110>

УДК 624.014+624.046.2



ПЕРЕЛЬМУТЕР А. В.

Д-р технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник науково-виробничого товариства з обмеженою відповідальністю SCAD Soft, Київ, Україна
e-mail: avp@scadsoft.com,
тел.: +38050-382-1625
ORCID: 0000-0001-9537-2728



ЮРЧЕНКО В. В.

Канд. технічних наук, доцент, кафедра металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури, м. Київ, Україна
e-mail: vitalina@scadsoft.com
тел.: (044) 249-71-91
ORCID: 0000-0003-4513-809X

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТОНКОСТІННИХ СТЕРЖНЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

АНОТАЦІЯ

У статті розглядаються області несучих здатностей для поперечних перерізів тонкостінних стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів. Звертається увага на важливу властивість області несучої здатності – її випуклість. У статті представлений випадок, коли внутрішні зусилля зі значеннями, меншими за розрахункові, можуть бути більш несприятливими для невикривої області несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів.

Представлено алгоритм автоматизованої побудови областей несучої здатності для перерізів стержневих елементів конструкцій та його програмну реалізацію в обчислювальному комплексі SCAD Office. Побудова області несучої здатності поперечного перерізу разом із випуклою оболонкою заданих комбінацій внутрішніх зусиль є гнучким інструментом для аналізу умов навантажень.

Виконані дослідження області несучої здатності для перерізів стержневих конструкцій із холодногнутих профілів слугують засобом критичного аналізу вимог норм проектування для досліджуваного класу конструкцій. Засвідчена невикривість та стрибкоподібна зміна межі області несучої здатності, що обумовлена неузгодженостями окремих положень нормативного документу [1]. Зокрема, такий характер області спостерігається при переході від однієї розрахункової ситуації (закритична стадія роботи елемента конструкції після досягнення явища втрати місцевої стійкості) до іншої (робота в межах пружних деформацій сталі).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: несуча здатність, тонкостінні стержневі системи, холодногнутий профіль, область несучої здатності

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

ПЕРЕЛЬМУТЕР А. В. Д-р технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник научно-производственного общества с ограниченной ответственностью SCAD Soft, г. Киев, Украина
e-mail: avp@scadsoft.com
тел.: +38050-382-1625
ORCID: 0000-0001-9537-2728

ЮРЧЕНКО В. В. Канд. технических наук, доцент, кафедра металлических и деревянных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры, г. Киев, Украина
e-mail: vitalina@scadsoft.com
тел.: (044) 249-71-91
ORCID: 0000-0003-4513-809X

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются области несущей способности для поперечных сечений тонкостенных стержневых элементов конструкций из холодногнутих профилей. Обращается внимание на важную особенность области несущей способности – ее



выпуклость. В статье представлен случай, когда комбинация внутренних усилий со значениями, которые не являются расчетными для первой группы предельных состояний, может оказаться более неблагоприятной для невыпуклой области несущей способности стержневых элементов из холодногнутых профилей.

Представлен алгоритм автоматизированного построения областей несущей способности для сечений стержневых элементов конструкций и его программная реализация в вычислительном комплексе SCAD Office. Построение области несущей способности поперечного сечения, совмещенное с выпуклой оболочкой заданных комбинаций внутренних усилий, является гибким инструментом для анализа условий нагружения рассматриваемой конструкции. В случае, когда выпуклая оболочка внутренних усилий не выходит за границы области несущей способности сечения, можно гарантировать, что и различные комбинации сочетаний исходных вариантов внутренних усилий не будут неблагоприятными.

Изучение области несущей способности для сечений стержневых конструкций из холодногнутых профилей служит способом критического анализа требований норм, регламентирующих расчет и проектирование рассматриваемого класса конструкций. В результате выполненных исследований выявлена невыпуклость и скачкообразное изменение границ области несущей способности поперечных сечений стержневых элементов из холодногнутых профилей, обусловленное несогласованностью отдельных положений нормативного документа. Такой характер области наблюдается при переходе от одной расчетной ситуации (закритическая работа элемента конструкции после достижения явления местной потери устойчивости или потери устойчивости формы сечения) к другой (работа в границах упругих деформаций стали). Кроме того, скачкообразное изменение несущей способности также характерно при корректировке изгибающего момента за счет смещения центра масс редуцированного поперечного сечения по отношению к центру масс поперечного сечения брутто.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несущая способность, тонкостенные стержневые системы, холодногнутый профиль, область несущей способности

LOAD-BEARING CAPACITY REGION ANALYSIS OF THIN-WALLED STRUCTURAL MEMBERS FROM COLD-FORMED PROFILES

PERELMUTER A. V. Dr.Sci.(Eng), The senior scientific employee, The main scientific employee of Scientific Industrial Association SCAD Soft, Kyiv, Ukraine

e-mail: avp@scadsoft.com

тел.: +38050-382-1625

ORCID: 0000-0001-9537-2728

YURCHENKO V. V. Candidate of Technical Sciences, associate professor, Steel and Wooden Structures Departments of Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine

e-mail: vitalina@scadsoft.com

tel.: (044) 249-71-91

ORCID: 0000-0003-4513-809X

ABSTRACT

Load-bearing capacity region for cross-sections of thin-walled cold-formed structural members in terms of design codes [1] has been considered. The main attention has been paid on important property of the region is its convexity. The paper presents a case when internal forces with not ultimate design values can be unfavorable for a non-convex load-bearing capacity region of the cold-formed structural members.

Algorithm for automatic generation of load-bearing capacity regions for structural sections has been presented and implemented in SCAD Office software package. Construction of load-bearing capacity regions of a section combined with a convex shell of specified internal forces is flexible tool for analysis of load conditions.

Load-bearing capacity region study has been performed for cross-sections of cold-formed structural members as a mean for critical analysis of code-based requirements and regulations used for verifications of considered type of structures. Non-convexity and abrupt change of load-bearing capacity region occur here, which are caused by some inconsistencies with the code requirements. In particular, these effects arise due to some kinds of strict logical transitions from one design situation (post-critical buckling behavior) to another (elastic behavior).

Key words: load-bearing capacity, thin-walled structural members, cold-formed profile, load-bearing capacity region

ВСТУП

У системі SCAD Office широко використовується побудова областей несучої здатності, які відрізняються тим, що враховують повний набір нормативних вимог, що висуваються до розгляданого класу конструкцій. Форма області несучої здатності перерізу, а також характер її границь дозволяє у багатьох випадках детально проаналізувати вимоги норм проектування.

У зв'язку з імплементацією Єврокодів в Україні, зокрема норм проектування конструкцій із холодногнутих профілів [1, 2], виникла необхідність у перевірці несуперечності, узгодженості та повноти нормативних вимог. Аналіз меж області дозволяє виявити протиріччя окремих положень розгляданого нормативного документу, а також погане стикування (не гладке спряження) окремих положень нормативних вимог.



ОБЛАСТЬ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПЕРЕРІЗІВ СТЕРЖНЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Нормативні вимоги, щодо забезпечення необхідної несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів, що висувуються до деякого розрахункового перерізу конструкції, можна записати у вигляді деякого набору обмежень-нерівностей, які описують несучу здатність досліджуваного класу конструкцій, щодо втрати міцності, а також загальної та місцевої стійкості:

$$\Phi(s_{jmk}) \leq 1, 0. \quad (1)$$

Кожне з обмежень (1) функціонально залежить від значень внутрішніх зусиль $s_{jmk} = \{N_{jmk}, M_{y,jmk}, Q_{z,jmk}\}$, що виникають у m -му розрахунковому перерізі j -го стержневого елементу конструкції при дії k -ої розрахункової комбінації навантажень:

$$\Phi(s_{jmk}) = \{\xi_i = \varphi_i(N_{jmk}, M_{y,jmk}, Q_{z,jmk}) \leq 1, 0\};$$

$$i = 1 \dots N_{LBC} \quad (2)$$

тут N_{LBC} – загальна кількість обмежень-нерівностей, що визначають несучу здатність стержневих елементів із холодногнутих профілів, щодо втрати міцності, а також загальної та місцевої стійкості. Числове значення лівої частини обмежень-нерівностей $\xi_i = \varphi_i(N_{jmk}, M_{y,jmk}, Q_{z,jmk})$ будемо називати коефіцієнтом використання обмеження.

Кожне з обмежень $\varphi_i(N_{jmk}, M_{y,jmk}, Q_{z,jmk})$ (2) визначає деяку область у просторі внутрішніх зусиль (у нашому випадку тривимірному), а перетин усіх нерівностей сукупності нормативних обмежень $\Phi(s_{jmk})$ утворює область несучої здатності перерізу Ω_s у термінах розглядуваних норм проектування (рис. 1). Для кожної точки

області несучої здатності перерізу максимальний коефіцієнт використання обмеження складає $\xi_{max} = \max\{\xi_i \mid i = 1 \dots N_{LBC}\} \leq 1, 0$.

Однією із найважливіших властивостей області несучої здатності є її випуклість. Наголосимо, що саме випуклість області несучої здатності перерізу дає нам право обмежитись у лінійному розрахунку перевітками такого перерізу на дію лише тих поєднань внутрішніх зусиль у перерізі, для яких характерними є екстремальні (мінімальні або максимальні) значення [3, 4].

Форма області несучої здатності Ω_s цілком та повністю визначається системою обмежень (1), що регламентуються вимогами норм на проектування даного класу конструкцій. При побудові області несучої здатності Ω_s окрім обмежень міцності, розглядаються також обмеження загальної та місцевої стійкості, які можуть спричинити невикуклу форму області несучої здатності перерізів із холодногнутих профілів. Це зумовлює необхідність виконання подальших досліджень форми області несучої здатності перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів.

АВТОМАТИЗОВАНА ПОБУДОВА ОБЛАСТІ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ У СЕРЕДОВИЩІ SCAD OFFICE

Для стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів, у перерізах яких під навантаженням можуть виникати трійка внутрішніх зусиль (поздовжня сила, згинальний момент та відповідна поперечна сила), область несучої здатності представляє собою тривимірну геометричну фігуру. Найбільш наглядно відобразити область несучої здатності перерізів можна за допомогою її ортогонального проєкціювання на деяку площину, що визначається парою внутрішніх зусиль.

У середовищі SCAD Office широко

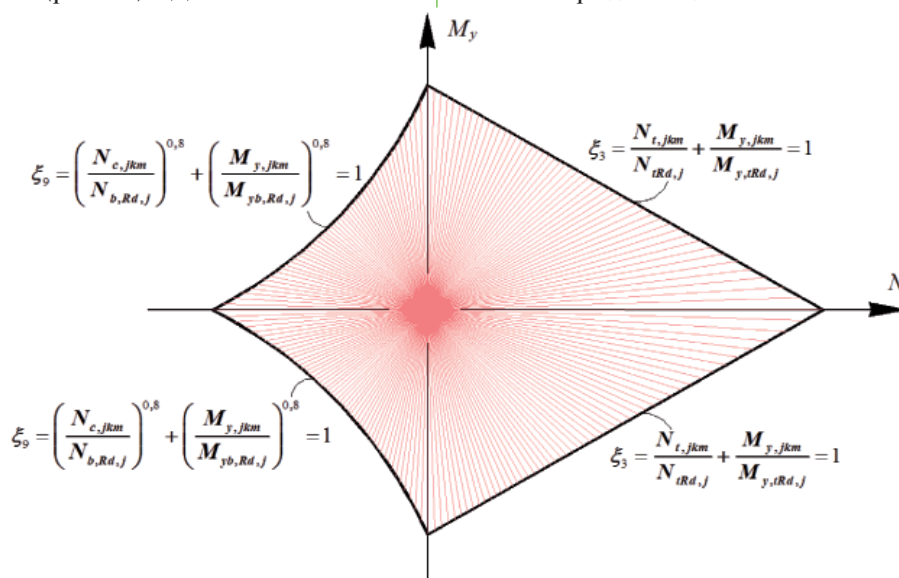


Рис. 1. Формування області несучої здатності перерізу у двовимірному просторі внутрішніх зусиль (приклад)



використовується побудова областей несучої здатності, що відрізняються врахуванням повного набору нормативних вимог (обмежень міцності, загальної та місцевої стійкості), що висувуються до того чи іншого елемента конструкції, для якого будується область.

Побудова двовимірної проекції області несучої здатності перерізу виконується за наведеним нижче алгоритмом. Обирається пара внутрішніх зусиль (наприклад, пара «поздовжня сила N – згинальний момент M_y »), у системі координат якої буде побудована ортогональна проекція області несучої здатності. Решта внутрішніх зусиль у перерізі фіксуються на деякому рівні (задаються користувачем або приймають нульові значення). При деякому фіксованому значенні відношення згинального моменту M_y до поздовжньої сили N (фактично, на промені ea , випущеному із початку координат під кутом $\alpha = \arctg(M_y / N)$ до осі абсцис, вимірюваному проти годинникової стрілки) вишукується точка, відстань до якої від початку координат є найбільшою та для якої ще виконуються нормативні обмеження (1). Для такої точки деяке (або деякі) обмеження із сукупності Φ приймає граничне значення $\varphi_i(N_{jmk}, M_{y,jmk}, Q_{z,jmk}) = 1,0$, тому ця точка належить границі двовимірної ортогональної проекції області несучої здатності перерізу.

Уся границя області несучої здатності будується шляхом перебору кутів α (із кроком 1°), що визначають положення променів ea . Таким чином будуються двовимірні ортогональні проекції області несучої здатності для будь-якої заданої пари внутрішніх зусиль ($N - Q_z$, $M_y - Q_z$ тощо).

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПЕРЕРІЗІВ СТЕРЖНЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Автоматизована побудова області несучої здатності перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів забезпечує можливість дослідити форму області, а також характер її меж, що дозволяє детально проаналізувати нормативні вимоги, що висувуються до розглядуваного класу конструкцій. Аналіз границь області несучої здатності перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів дозволяє, зокрема, виконати перевірку несуперечності, узгодженості та повноти системи обмежень (1). При цьому легко виявляються погане стикування (не гладке спряження) окремих нерівностей системи обмежень.

Побудуємо ортогональну проекцію області несучої здатності в системі координат «поздовжня сила N – згинальний момент M » для подвійно симетричного поперечного перерізу, що складається із двох холодногнутих швелерних профілів з висотою профілю $h = 300$ мм та шириною полицки $b = 150$ мм, виконаних із сталі S355N EN 10025 з межею плинності $f_{yb} = 355$ МПа та межею міцності $f_u = 470$ МПа. Розрахункова довжина стержневого елемента в обох головних площинах інерції складає 6,0 м, часткові коефіцієнти надійності $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1$.

Область несучої здатності Ω_s такого перерізу відповідно до нормативних вимог [1, 2] наведена на рис. 2.

Межі області несучої здатності $GOPB$ та $HQRC$ відповідають обмеженням міцності, при одночасній

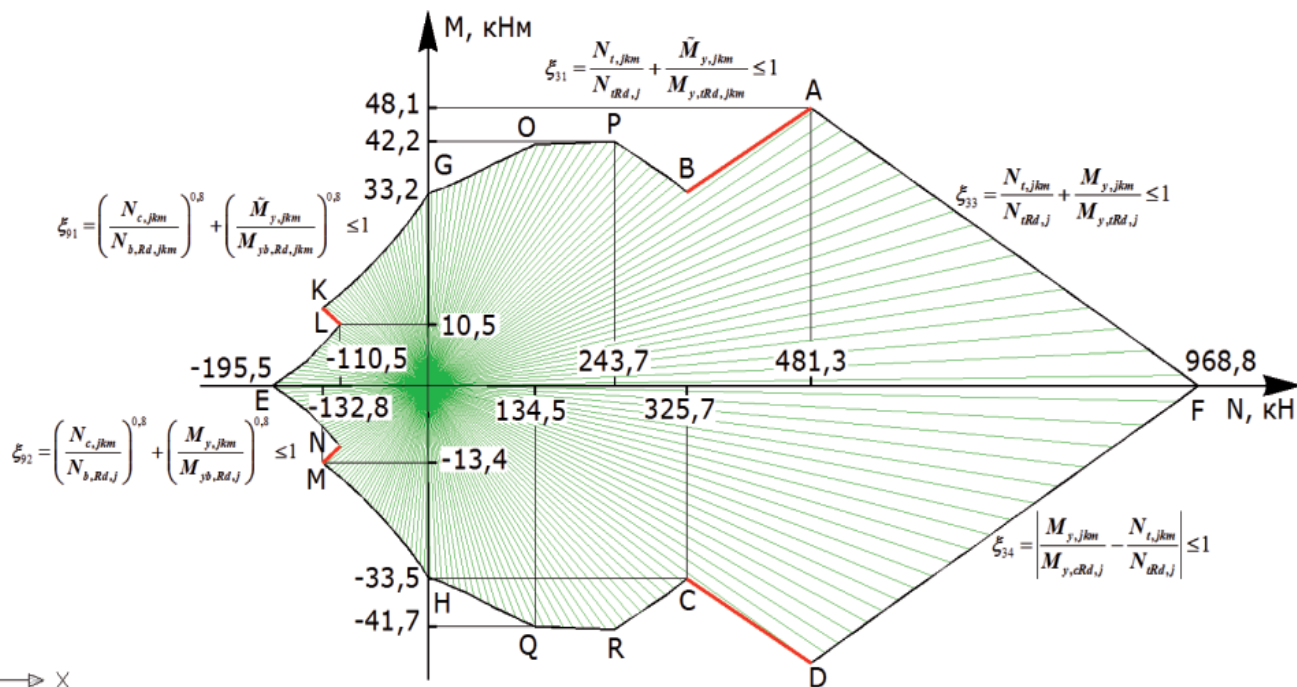


Рис. 2. Ортогональна проекція області несучої здатності Ω_s складеного перерізу із двох холодногнутих швелерних профілів в координатній системі «поздовжнє зусилля N – згинальний момент M »



дії зусилля розтягу та згинального моменту, сформульованим залежно від геометричних характеристик редукованого перерізу, тобто коли переріз зазнав втрати місцевої стійкості. Як показано на рис. 2 на ділянках GOP і HQR границі побудованої області при збільшенні поздовжньої сили розтягу несуча здатність перерізу збільшується, що пояснюється одночасним збільшенням геометричних характеристик редукованого перерізу за рахунок зменшення розмірів (ширини) тих ділянок перерізу, що втрачають місцеву стійкість.

Границі області несучої здатності AF і DF відповідають тим самим обмеженням міцності при одночасній дії зусилля розтягу та згинального моменту, але сформульованим вже залежно від геометричних характеристик перерізу брутто, тобто коли переріз не зазнав втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу.

В напруженому стані, коли у перерізі діють тільки нормальні напруження розтягу, розглядуваний переріз не зазнає втрати місцевої стійкості. У цьому випадку, обмеження міцності при одночасній дії поздовжньої сили та згинального моменту формулюються залежно від геометричних характеристик перерізу брутто. Їм відповідають границі AF і DF області несучої здатності Ω_s .

Стрибки AB і CD області несучої здатності відповідають переходу перерізу у закритичну стадію роботи, що характеризується настанням явища втрати місцевої стійкості елементів перерізу та супроводжується переходом від обмежень міцності, сформульованих для редукованого поперечного перерізу, до обмежень міцності, сформульованих для поперечного перерізу брутто.

Межі області несучої здатності GK , HM , EL , EN відповідають обмеженню загальної стійкості при

одночасній дії поздовжньої сили стику та згинального моменту математичної моделі, сформульованому залежно від геометричних характеристик редукованого поперечного перерізу для випадку, коли переріз зазнав втрати місцевої стійкості. Стрибки KL і MN області відповідають коригуванню згинального моменту за рахунок зміщення центру ваги редукованого поперечного перерізу по відношенню до центру ваги поперечного перерізу брутто. Оскільки таке коригування виконують лише за умови, що його результатом буде збільшення значення згинального моменту, і не виконують у протилежному випадку, отримаємо стрибкоподібне зменшення несучої здатності на області несучої здатності Ω_s .

Відсутність властивості випуклості області несучої здатності для перерізів стержневих елементів досліджуваного класу конструкцій може призвести до неприємних наслідків, пов'язаних із тією обставиною, що за традицією оцінюючі найнесприятливіші поєднання внутрішніх зусиль, інженери або взагалі не розглядають деякі навантаження та впливи (у тому випадку, коли вони чинять розвантажувальну дію), або враховують їх повністю (із екстремальним або розрахунковим значенням навантаження). Це правило є цілком справедливим для випуклої області несучої здатності, тоді як для не випуклої області не вигідним може виявитись поєднання внутрішніх зусиль з проміжними (не екстремальними) значеннями.

Проілюструємо сказане на прикладі. Розглянемо отриману не випуклу область несучої здатності (рис. 2) складеного перерізу із двох холодногнутих швелерних профілів, при дії на конструкцію двох незалежних навантажень P і Q (рис. 3).

Точка P (на рис. 3) відповідає парі внутрішніх зусиль (поздовжній силі N та згинальному момен-

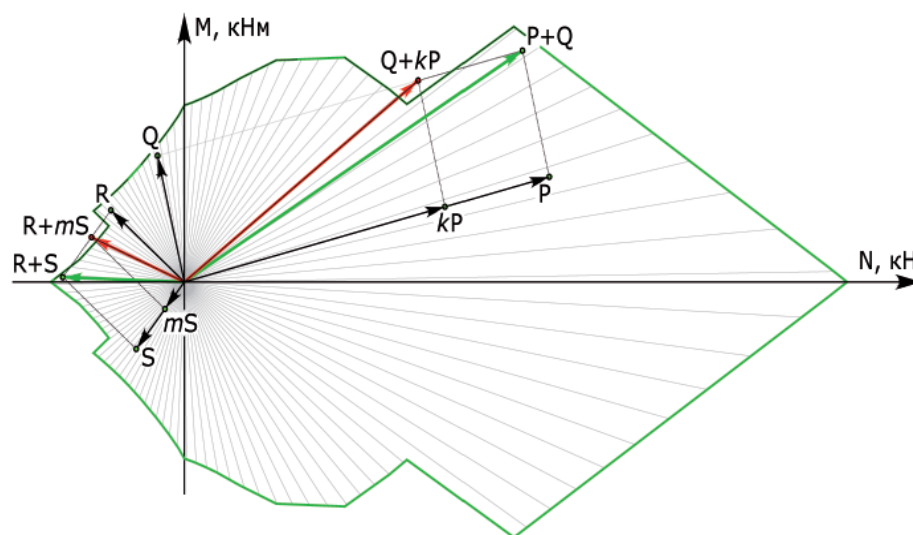


Рис. 3. Перевірка несучої здатності перерізу на дію комбінацій навантажень з «не екстремальними» значеннями



ту M), що виникають у розглядуваному перерізі при дії навантаження P , а точка Q – від дії навантаження Q . З рис. 3 не важко побачити, що нормативні вимоги виконуються як при перевірці перерізу на дію кожного навантаження P і Q окремо, так і при перевірці перерізу на дію їх повної суми $(P + Q)$, оскільки точки P , Q , а також точка $P + Q$ належать області несучої здатності перерізу. Але при дії «неповної» лінійної комбінації навантажень $(Q + k \cdot P)$, коли $k < 1$, нормативні вимоги порушуються, оскільки у розглядуваному перерізі при дії $Q + k \cdot P$ виникає пара внутрішніх зусиль, що відповідає точці $Q + k \cdot P$ на рис. 3, яка не належить області його несучої здатності.

Небезпеки, пов'язані з невивуклістю області несучої здатності, вказують на необхідність виконання аналізу близькості реальної сукупності поєднань розрахункових внутрішніх зусиль до тієї або тих ділянки області Ω_s , де проявляються

властивості невивуклості.

Практично такий аналіз може бути реалізований із використанням додаткового інструментарію, який надається компонентами SCAD Office. Цей інструментарій забезпечує можливість відобразити на області несучої здатності розглядуваного перерізу усю множину варіантів поєднань внутрішніх зусиль, на дію яких переріз підлягає перевірці, у вигляді набору точок, кожна з яких відповідає одному із таких варіантів (рис. 4). Також демонструється випукла оболонка цих точок, яка охоплює множину поєднань внутрішніх зусиль, що є лінійними комбінаціями вихідних варіантів поєднань внутрішніх зусиль. У випадку, коли зазначена випукла оболонка не виходить за межі області несучої здатності перерізу, можна гарантувати, що й різноманітні комбінації поєднань вихідних варіантів внутрішніх зусиль не будуть небезпечними.

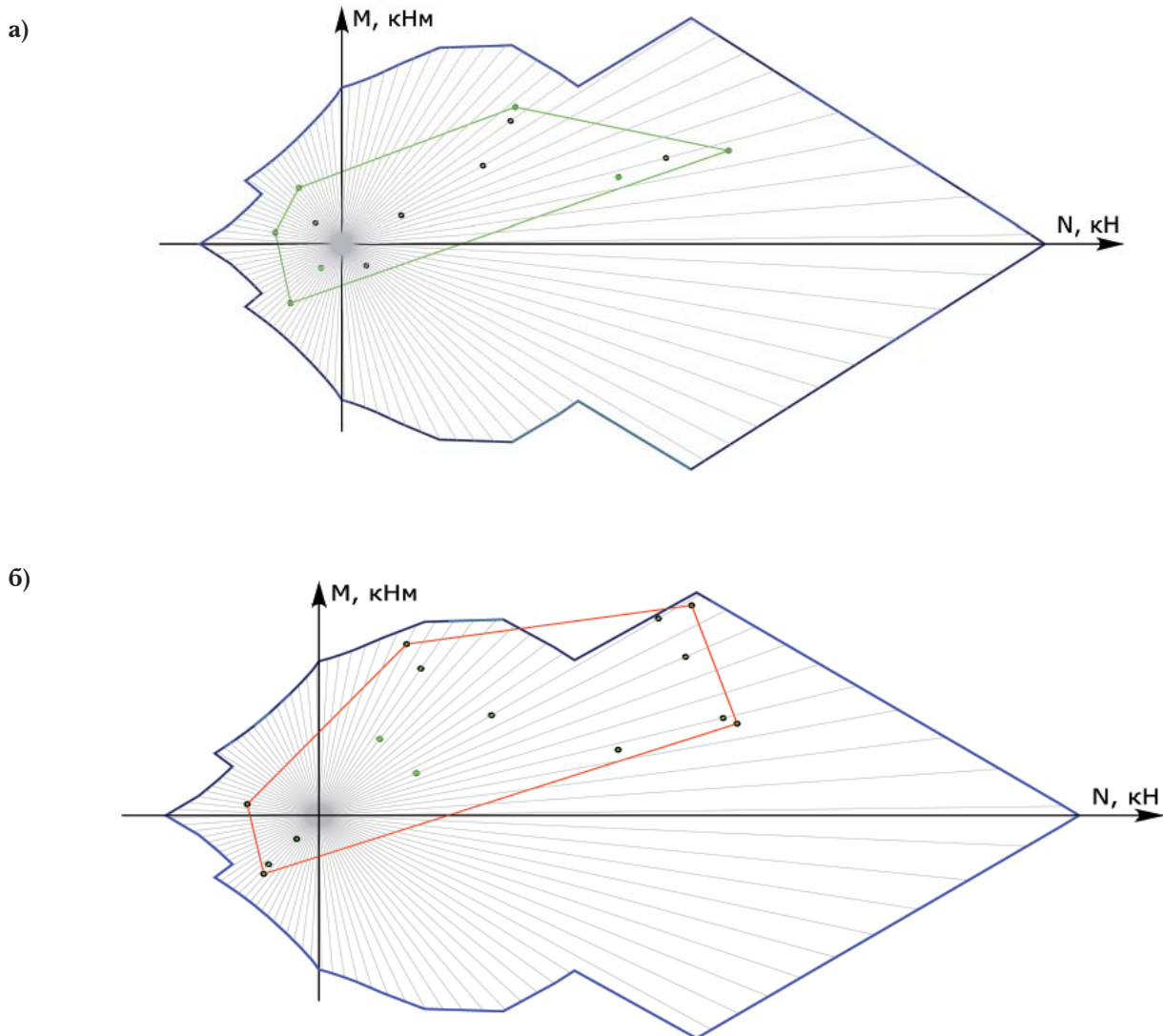


Рис. 4. Задані комбінації навантажень та їх випукла оболонка, суміщена з областю несучої здатності перерізу стержневого елемента із холодногнутих профілів (а – випукла оболонка не виходить за межі області; б – випукла оболонка виходить за межі області).



ВИСНОВКИ

Виконані дослідження форми області несучої здатності перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів засвідчили її невинуватість. Сtribкоподібна зміна несучої здатності стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів характерна при переході поперечних перерізів у закритичну стадію роботи, що характеризується втратою місцевої стійкості або втратою стійкості форми перерізу. Окрім того, стрибкоподібна зміна несучої здатності таких елементів також характерна при коригуванні згинального моменту за рахунок зміщення центру ваги редукованого поперечного перерізу по відношенню до центру ваги поперечного перерізу бруто.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 ЄВРОКОД 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів (EN 1993-1-3:2006, IDT). – Київ, Мінрегіонбуд України, 2012.
2. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012 ЄВРОКОД 3: Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструктивні елементи (EN 1993-1-5:2005, IDT). – Київ, Мінрегіонбуд України, 2012.
3. Гавриленко, І. С., Гиренко С. В., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А., Юрченко В. В. Область несущей способности как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office / И. С. Гавриленко, С. В. Гиренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, В. В. Юрченко // Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 25-26 жовтня 2017. – К.: Талком. – С. 39 – 42.
4. Gavrilenko, I. S. Load-bearing capacity as an interactive analysis tool in SCAD Office / I. S. Gavrilenko, S. V. Girenko, A. V. Perelmuter, M. A. Perelmuter, V. V. Yurchenko // Proceedings of the METNET Seminar 2017 in Cottbus / Eds. by Kuldeep Viridi & Lauri Tenhunen. – Häme University of Applied Science, 2018. – pp. 112 – 127.

REFERENCES:

1. DSTU-N B EN 1993-1-3:2012 EUROKOD 3. Proektuvannya stalevyh konstruktsiy. Chastyna 1-3. Zagalni pravyla. Dodatkovy pravyla dlya holodnoformovanyh elementiv i profilovanih lystiv (EN 1993-1-3:2006, IDT). – Kyiv, Minregionbud Ukrainy, 2012.
2. DSTU-N B EN 1993-1-5:2012 EUROKOD 3: Proektuvannya stalevyh konstruktsiy. Chastyna 1-5. Plastinchasti konstruktyvni elementy (EN 1993-1-5:2005, IDT). – Kyiv, Minregionbud Ukrainy, 2012.
3. Gavrilenko, I.S. Oblast nesuschey sposobnosti kak interaktivniy instrument analiza v SCAD Office / I.S. Gavrilenko, S.V. Girenko, A.V. Perelmuter, M.A. Perelmuter, V.V. Yurchenko // Suchasni metodi i problemno-orientovani kompleksi rozrahunku konstruktsiy i iih zastosuvannya u proektuvanni i navchalnomu protsesi: tezi dopovidey Mizhnarodnoii naukovo-praktichnoii konferentsiyi. – K.: Talkom, 2017. – P. 39 – 42.
4. Gavrilenko, I.S. Load-bearing capacity as an interactive analysis tool in SCAD Office / I.S. Gavrilenko, S.V. Girenko, A.V. Perelmuter, M. A. Perelmuter, V. V. Yurchenko // Proceedings of the METNET Seminar 2017 in Cottbus / Eds. by Kuldeep Viridi & Lauri Tenhunen. – Häme University of Applied Science, 2018. – pp. 112 – 127.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2019 року