

УДК 624.014.2 (624.074.433)

Визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів

Білик А.С., к.т.н., Лапонов М.В.

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація. У статті розглядається методика визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів.

Аннотация. В статье рассматривается методика определения геометрических характеристик холодноформированных тонкостенных арковых профилей.

Abstract. In article is presented a method of determination geometrical properties of cold-formed thin walled arch members.

Ключові слова: місцева стійкість, закритична робота, сталеві тонкостінні конструкції, безкаркасні аркові покриття.

Постановка проблеми. У теперішній час в Україні спостерігається великий попит на безкаркасні аркові конструкції, що обумовлено в першу чергу їх низькою вартістю та можливістю швидкого зведення.

Безкаркасні аркові конструкції складаються з однотипних лоткоподібних елементів, які профілюються безпосередньо на будівельному майданчику, і характеризуються високою тонкостінністю граней, гнучкість яких досягає значень $\lambda = 100 \dots 350$. Працюючи у складі безкаркасних споруд, профільовані елементи суміщують несучі і огорожувальні функції та безпосередньо сприймають атмосферні навантаження, під дією яких в елементах виникає складний напружений стан, що обумовлений просторовою роботою споруди, роботою елементів у закритичній стадії, безпосереднім прикладанням навантаження до поверхні граней елементів. Найбільш відомою є сучасна технологія та обладнання фірми «MISC Industries Inc.» (США).

Попри досить широке розповсюдження та використання сучасних безкаркасних аркових покриттів досить не розроблена методика їх проектування, яка б відповідала дійсній роботі конструкцій. На даний час існують тільки деякі загальні рекомендації щодо розрахунку вищенаведених конструкцій, випущені деякими виробниками як обладнання, так і самих гнутих профілів.

Огляд останніх досліджень. Використання тонкостінних холодноформованих профілів збільшується з кожним роком, при цьому виробники постійно пропонують все більш нові та ефективні конструктивні

елементи [3]. У статті [4] зазначається, що проектування та розрахунок тонкостінних аркових покриттів має ряд особливостей, обумовлених у першу чергу тонкостінністю профілів, їх підвищеною деформативністю, несиметричністю перерізів, початковими недосконаlostями форми, гофруванням полиць та стінок профілю при його вальцюванні та іншими чинниками. Національні норми наразі не описують особливості розрахунку тонкостінних профілів, зокрема умови редукування перерізу [10]. Загальні рекомендації із розрахунку конструкцій з тонкостінних профілів наведені у [5]. У посібнику [7] наведено алгоритм розрахунку пологих арок із профільованих настилів. Необхідність подальшого дослідження особливостей роботи безкаркасних аркових покриттів підтверджується у [9] на основі проведених випробувань.

Постановка задачі. Таким чином, актуальною задачею є визначення методики розрахунку та особливостей роботи поперечних перерізів холодноформованих тонкостінних трапецієподібних аркових профілів системи МІС у складі аркового покриття, а також врахування впливу наявного поперечного гофрування на криволінійних ділянках профілів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Особливістю розрахунку конструкцій з тонкостінних гнутих профілів є необхідність врахування їх закритичної роботи, яка полягає у тому, що при досягненні певного рівня стискальних напружень у стінках та полицях втрачається місцева стійкість. При цьому з роботи виключається ділянка, яка втратила стійкість і відбувається перерозподіл напружень, проте це не призводить до втрати несучої здатності і профіль продовжує сприймати зростаюче навантаження.

У відповідності з зарубіжними методиками розрахунку тонкостінних профілів [1, 8] ширина ділянок стиснутих елементів поперечного перерізу, що втрачають стійкість і виключаються з розрахунку, нелінійно залежить від фактичного співвідношення рівня напружень на початку та кінці ділянки та товщини елемента, що розглядається. За звичайних умов у полицях це співвідношення дорівнює одиниці, а у стінках воно може змінюватись залежно від напружено-деформованого стану (рівномірний стиск, згин, стиск зі згином), що, у свою чергу, призводить до зміни ширини ділянки стінки, що включається до розрахунку.

Відповідно до Єврокоду 3, частина 1-3 [1, 2] та норм проектування США AISI [8] у тонкостінних профілях можуть виникати три види втрати стійкості:

1. Місцева втрата стійкості.
2. Втрата стійкості форми перерізу.
3. Загальна втрата стійкості.

У загальному випадку при навантаженні тонкостінних профілів спочатку виникає місцева втрата стійкості, а також втрата стійкості форми поперечного перерізу. Тому при розрахунку на міцність, стійкість та жорсткість холодноформованих тонкостінних профілів враховується вплив втрати місцевої стійкості та стійкості форми поперечного перерізу, що досягається шляхом застосування ефективних геометричних характеристик поперечного перерізу:

- ефективна площа поперечного перерізу A_{eff} ;
- ефективний момент опору поперечного перерізу W_{eff} ;
- ефективний момент інерції поперечного перерізу I_{eff} .

Вплив втрати стійкості може бути оцінений лінійним або нелінійним розрахунком на стійкість, чисельними методами а також випробуваннями.

Безкаркасні аркові покриття за розрахунковою схемою розглядаються як двохарнірні арки. По довжині покриття спостерігається нерівномірний розподіл внутрішніх зусиль, тому геометричні характеристики аркових профілів залежать від їх фактичного напружено-деформованого стану. Задача розрахунку безкаркасних аркових покриттів ускладнюється ще й тим, що геометричні характеристики поперечного перерізу змінюються по довжині покриття, оскільки технологія виробництва профілів дозволяє змінювати радіус сегментів безпосередньо під час прокату для отримання довільного абрису покриття. Відтоді окремі ділянки арки можуть бути прямолінійними і не мати поперечного гофрування зовсім.

При розгляді розподілення внутрішніх зусиль від типових зовнішніх навантажень (власна вага, сніг, вітер) по довжині аркового покриття зазвичай можна виділити три характерних небезпечних перерізи:

- приопорна ділянка: « $-N_{max}$ »;
- ділянка гребеневого вузла арки: « $+M_{max}; N_{відп.}$ »;
- ділянка між гребневим вузлом та опорою арки: « $-M_{max}; N_{відп.}$ ».

Тому при визначенні геометричних характеристик аркових профілів можна розглядати три можливі випадки їх роботи:

- рівномірний стиск усього перерізу;
- стиск верхньої полиці, розтяг нижньої;
- стиск нижньої полиці, розтяг верхньої.

Слід зазначити, що розрахунковий небезпечний переріз може знаходитись на ділянках, що розташовані між вищенаведеними. Тому на практиці за отриманими геометричними характеристиками необхідно виконувати попередні розрахунки, після чого уточнювати їх залежно від фактичного напруженого стану аркових профілів.

Поперечний переріз безкаркасного аркового покриття (рис. 1,а) утворюється з окремих профілів (рис. 1,б) шляхом їх поєднання у рівні верхнього поясу за допомогою завальцьовування відгинів країв профілів у фальцевий замок за допомогою спеціальної машинки. При цьому забезпечується міцне та герметичне з'єднання окремих профілів у просторову оболонку.

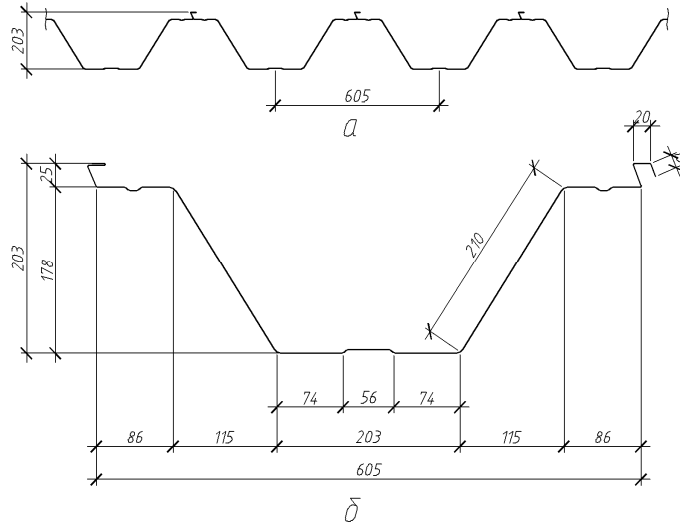


Рис. 1. Схеми поперечних перерізів:
а – аркового покриття; б – окремого профілю МІС-240

Ефективні геометричні характеристики визначаються для одного профілю МІС-240, поперечний переріз якого наведено на рис. 1,б, після чого приводяться до 1 м довжини поперечного перерізу аркового покриття. При визначенні геометричних характеристик можна вважати, що фальцевий замок забезпечує досить жорстке з'єднання окремих елементів і при цьому забезпечується рівномірність деформацій всього арочного покриття. Тому поперечний переріз фальцевого замку включається до ефективного поперечного перерізу всього аркового покриття і розглядається як окремих елемент жорсткості верхніх полиць.

Ефективна ширина стиснутих елементів визначається у відповідності з ANSI/AISI S100-2007 [8] шляхом множення повної ширини елемента на знижувальний коефіцієнт, що враховує втрату стійкості пластини:

$$b_{eff} = \rho \cdot \omega,$$

де ω – розрахункова ширина пластини; ρ – знижувальний коефіцієнт що враховує втрату стійкості пластини. Для пластини з двостороннім закріпленням коефіцієнт ρ визначається за формулами:

$$\rho = 1,0, \text{ при } \lambda \leq 0,673; \rho = \frac{1 - 0,22}{\lambda} \leq 1, \text{ при } \lambda \geq 0,673,$$

де λ – умовна гнучкість пластини, яка визначається за формулою

$$\lambda = \frac{1,052}{\sqrt{K}} \cdot \frac{w}{t} \sqrt{\frac{f_d}{E}};$$

f_d – розрахунковий опір сталі; E – модуль пружності; w – розрахункова ширина пластини; K – коефіцієнт стійкості; t – товщина елемента. Коефіцієнт стійкості визначається як:

$$K = 4 + 2(1 - \psi)^2 + 2(1 - \psi),$$

де ψ – відношення напружень по краях пластини.

Геометричні характеристики визначалися при значеннях:

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \nu = 0,3; \quad R_y = 240 \text{ МПа}; \quad \gamma_M = 1,0.$$

Для визначення значення критичного навантаження було створено скінченноелементну модель фрагмента прямолінійної ділянки аркового покриття без поперечного гофрування (рис. 2) за допомогою «PRE/POST processor FEMAP, version 10.3» в системі «Windows 7». Фрагмент покриття було змодельовано за допомогою оболонкових скінченних елементів типу «plate», що жорстко з'єднувались між собою у вузлах. Довжина досліджуваного фрагмента аркового покриття становила 480 мм, ширина 2420 мм.

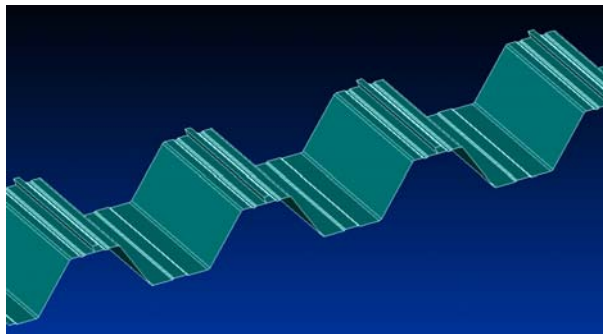


Рис. 2. Скінченноелементна модель фрагмента прямолінійної ділянки аркового покриття

Закріплення фрагмента моделювалося шляхом накладання ряду в'язей як по вузлах скінченних елементів, так і по їх гранях. В опорній частині фрагмента – жорстке закріплення, тобто унеможливлення всіх можливих

кутових та лінійних переміщень по всіх вузлах поперечного перерізу опорного вузла схеми. По торцях фрагмента заборонялося можливе лінійне переміщення по осі X , що дозволило попередити втрату місцевої стійкості непідкріпленого звису половини полиці та врахувати спільну роботу двох окремо розташованих звисів як цілої полиці, що найбільш точно відповідає реальній роботі аркового покриття в цілому.

Розрахунки на міцність та стійкість фрагмента аркового покриття виконувались за допомогою програмного комплексу «NX Nastran» із використанням модуля нелінійного аналізу «Nonlinear Static analysis». Використання останнього пов'язано з тим, що звичайний модуль розрахунку на стійкість «Buckling» може бути використаний для визначення критичних навантажень, при яких елементи поперечного перерізу втрачають стійкість, проте в ньому відсутній аналіз процесу переходу із існуючого стану рівноваги в закритичний. Лінійний аналіз стійкості за таких умов може призвести до значних похибок.

За результатами розрахунків для прямолінійної ділянки аркового покриття при згині, що викликає стиск верхніх полиць, втрата несучої здатності спостерігалася після втрати стійкості стінок профілів (рис. 3). При цьому плоскі ділянки фрагмента (пояси профілів) не втрачали стійкості після втрати стійкості стінками, що може свідчити про вплив їх проміжних елементів жорсткості.

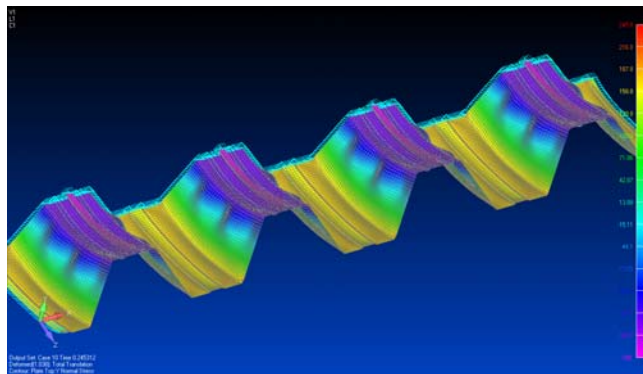


Рис. 3. Розподіл нормальних напружень при згині, що викликає стиск верхніх полиць

При згині, що викликає стиск нижніх полиць втрата несучої здатності спостерігалася після втрати стійкості нижнім поясом (рис. 4). При напруженнях, близьких до критичних, втрачала стійкість і стінка.

При рівномірному стиску профілю втрата несучої здатності спостерігалася після втрати стійкості стінками, а також нижніми полицями (рис. 5).

Верхні полиці не втрачали стійкість вочевидь через їх більшу жорсткість, зокрема через наявність фальцевого замка.

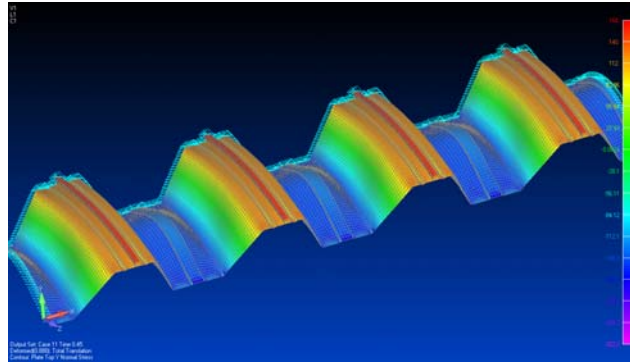


Рис. 4. Розподіл нормальних напружень при згині, що викликає стиск нижніх полиць

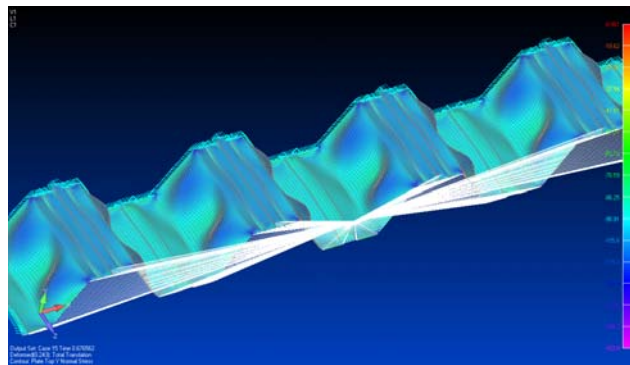


Рис. 5. Розподіл нормальних напружень при рівномірному стиску.
Показано також роззосереджене прикладення сили

За результатами розрахунків отримано числові значення зовнішніх критичних навантажень, при яких спостерігалася втрата несучої здатності фрагмента аркового покриття, а також відповідні їм значення максимальних нормальних напружень. Також було отримано значення навантажень, що спричиняють нормальні напруження на рівні 240 МПа та відповідні значення переміщень для профілів завтовшки 0,6 – 1,5 мм.

На основі значень критичних навантажень було виконано порівняння несучої здатності аркового профілю, що була визначена за допомогою програмного комплексу «NX Nastran», з несучою здатністю профілю, визначеною за геометричними характеристиками, отриманими за методиками Єврокод та AISI. Для цього визначалося значення моменту опору та площі поперечного перерізу, що відповідали напруженням σ_{240} :

$$W_{\text{відп.}} = \frac{M_{240}}{\sigma_{240}}, \quad A_{\text{відп.}} = \frac{F_{240}}{\sigma_{240}}.$$

Порівняння результатів показали, що для випадків чистого згину геометричні характеристики, розраховані за методикою AISI, більш точно відображають напружено-деформований стан, отриманий за результатами скінченноелементного моделювання. Проте, при рівномірному стиску отримано значну різницю, тому при складанні сортаменту прийнято площі поперечних перерізів, отримані в результаті комп'ютерного розрахунку, а інші характеристики - за методикою AISI.

Для дослідження впливу поперечного гофрування на напружено-деформований стан аркових профілів скінченноелементну модель було модифіковано шляхом уведення поперечних гофр (рис. 6) із кроком по довжині нижньої полиці 30 мм і заввишки – 2 мм в осях скінченних елементів. По довжині стінок поперечні гофри приймалися з кроком 45 мм. Наведені розміри прийнято узагальнено за результатами натурних обмірів реальних профілів, гофрованих поперечно при наданні радіального абрису.

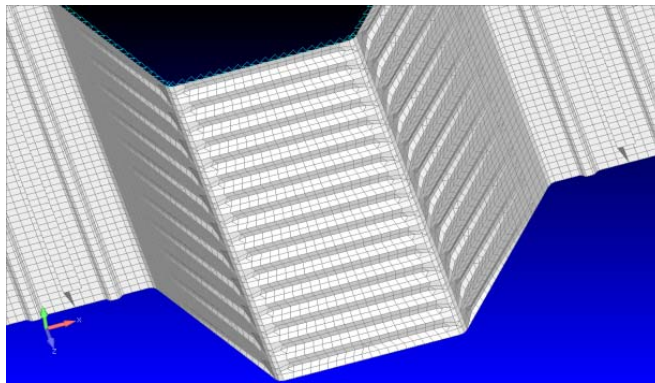


Рис. 6. Скінченноелементна модель фрагмента аркового покриття з поперечними гофрами

Розрахунки показали, що при згині, що викликає стиск верхніх полиць, втрата як загальної, так і місцевої стійкості не спостерігалася для всього діапазону навантажень та товщин профілів (рис. 7). При цьому нормальні напруження сприймалися переважно невеликими ділянками, що примикають до ребер гофрованих граней полиць та стінок, тому моментом втрати несучої здатності можна вважати досягнення напруженнями у цих ділянках рівня, що відповідає розрахунковому опору сталі.

При згині, що викликає стиск нижніх полиць (рис. 8), та при рівномірному стиску всього профілю (рис. 9) втрата несучої здатності спостерігалася після втрати стійкості стінкою, незважаючи на підкріплення гофрами.

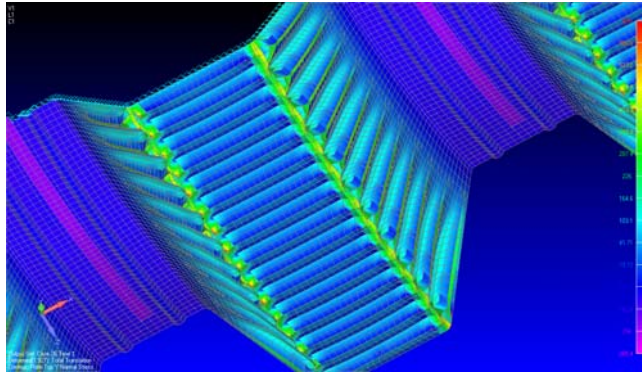


Рис. 7. Укрупнений фрагмент розподілу нормальних напружень при згині, що викликає стиск верхніх полиць

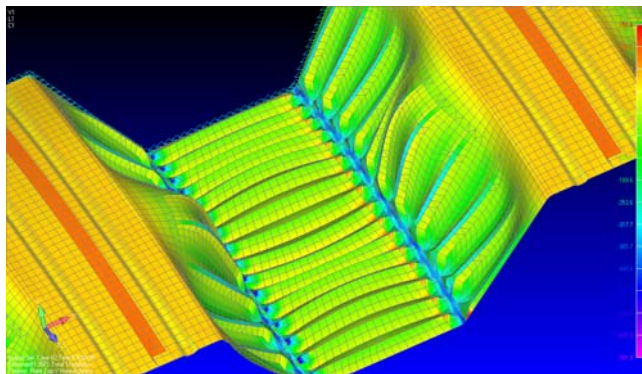


Рис. 8. Укрупнений фрагмент розподілу нормальних напружень при згині, що викликає стиск нижніх полиць

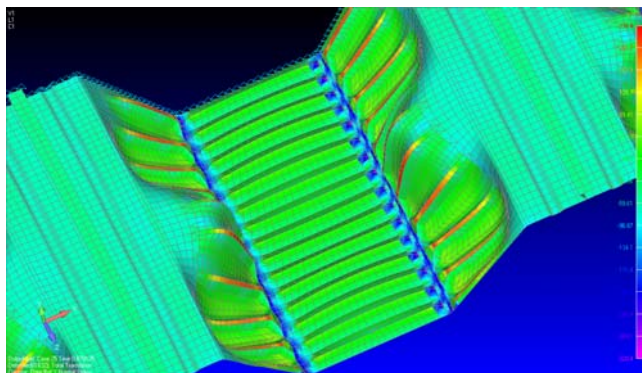


Рис. 9. Укрупнений фрагмент розподілу нормальних напружень при рівномірному стиску

Таким чином, при аналізі напружено-деформованого стану профілів із поперечним гофруванням встановлено, що поперечні гофри практично не сприймають нормальні напруження. Останні, у свою чергу, сприймаються вузькими ділянками, що примикають до ребер граней поперечного перерізу. Встановлено, що втрата несучої здатності може наступити тільки при досягненні та перевищенні нормальними напруженнями ребер рівня межі плинності сталі, бо значення нормальних напружень, що призводять до втрати стійкості граней профілів, перевищують розрахункові опори сталей, з яких виготовляються аркові профілі (240 – 380 МПа). В результаті розрахунків отримано числові значення зовнішніх критичних навантажень, при яких спостерігалася втрата несучої здатності фрагменту аркового покриття, а також відповідаючі їм значення максимальних нормальних напружень. Також було отримано значення навантажень, що спричиняють нормальні напруження на рівні 240 МПа та відповідні значення переміщень для профілів товщиною 0,6 – 1,5 мм.

Висновки

Описано методикау визначення геометричних характеристик для аркових гнутих тонкостінних профілів на основі аналізу чинних зарубіжних норм та результатів чисельних досліджень.

Окрім аналізу роботи прямолінійних ділянок профілів, вперше досліджено вплив поперечного гофрування на напружено-деформований стан аркових профілів. Зокрема при аналізі напружено-деформованого стану профілів з поперечним гофруванням встановлено, що нормальні напруження практично не сприймаються поперечними гофрами, а вузькими ділянками, що примикають до ребер граней поперечного перерізу. Також встановлено, що втрата несучої здатності може наступити тільки при досягненні та перевищенні нормальними напруженнями ребер рівня межі плинності сталі, бо значення нормальних напружень, що призводять до втрати стійкості граней профілів, перевищують розрахункові опори сталей, з яких виготовляються аркові профілі.

На основі проведених досліджень були вперше отримані геометричні характеристики прямолінійних та гофрованих холодноформованих тонкостінних аркових профілів МІС-240 в актуальному виробничому діапазоні товщин 0,6...1,5 мм для трьох характерних випадків з врахуванням їх закритичної роботи. Отриманий сортамент може бути використаний у реальному проектуванні, що дозволяє підвищити надійність і економічність рішень.

Результати впроваджено у оптимізаційно-розрахунковому комплексі для визначення оптимальних параметрів аркових покриттів, які працюють як системи зі змінною розрахунковою схемою при багатопараметричних навантаженнях [11].

Геометричні характеристики також можуть бути уточнені в результаті проведення натурних випробувань.

Література

- [1] Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3:2004. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Stage 34. CEN. European Committee for Standardisation. 2004.
- [2] Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-5:2006. Part 1-5: Plated structural elements. CEN. European Committee for Standardisation. 2006.
- [3] Айрумян Е.Л., Беляев В.Ф. Эффективные холодногнутые профили из оцинкованной стали – в массовое строительство // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 11.
- [4] Еремеев П.Г., Киселев Д.Б., Арменский М.Ю. К проектированию бескаркасных конструкций арочных сводов из холодногнутых тонколистовых стальных профилей // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2004. – № 7.
- [5] Айрумян Е.Л. Рекомендации по расчету стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей // СтройПрофиль. – 2009. – № 8 (78).
- [6] ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / Мінрегіонбуд України.
- [7] Калью Лооритс. Арки Раннила. Временное руководство.
- [8] North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. AISI STANDARD. 2007.
- [9] Еремеев П.Г., Киселев Л.Б., Армейский М.Ю., Бурлай С.И. Натурные испытания фрагментов панелей из холодногнутых тонколистовых стальных профилей для арочных сводов // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2004. – № 9.
- [10] ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції. Чииний з 1.12.2011. Мінрегіон, К: Сталь – 127 с.
- [11] Білик А.С. Оптимізація конструкцій з дискретно змінною схемою навантаження // «Современные конструкции..» Збірник наукових праць. – ОДАБА. – 2012. – С. 21-29.

Надійшла до редколегії 12.05.2012 р.