

УДК 621.791

Савуляк В. І., Бакалець Д. В., Тарасюк В. М.

**ПОЄДНАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ І ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПАЯННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕМОНТУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

Металоконструкції під час експлуатації сприймають статичні та динамічні навантаження, під впливом яких на найбільш навантажених ділянках виникають тріщини та інші пошкодження [1]. Для підвищення якості відновлення цілісності цих ділянок та зміцнення конструкцій загалом доцільним є вдосконалення відомих методів та технологічних прийомів, а також розробка та впровадження нових.

Високу ефективність ремонту тріщин показує одночасне застосування методів зварювання та високотемпературного паяння [2], що дозволяє подовжити ресурс та покращити інші експлуатаційні властивості. Найбільш розповсюдженими матеріалами для виготовлення зварних металоконструкцій залишаються вуглецеві та леговані сталі. Недоліком традиційних технологій зварювання є структурні перетворення в зоні термічного впливу (навколошовній зоні), що призводять до їх ослаблення та інтенсифікації корозійних процесів. Блокування корозії здійснюється різними способами, одним з яких є нанесення антикорозійних покриттів (кольорових металів) паянням.

Паяння вуглецевих та низьколегованих сталей не викликає особливих труднощів і може бути здійснено з використанням різноманітних припоїв і способів нагрівання. Це пояснюється тим, що окисна плівка на поверхнях цих сталей є хімічно нестійкою. Вона легко відновлюється та розчиняється у флюсах. За умов ретельної підготовки поверхні паяння таких сталей найчастіше всього здійснюється міддю або припоями на її основі.

Пильну увагу питанням взаємодії розплавів міді із сталями приділили В. В. Чигарьов, Ю. Г. Бобро, П. А. Гавриш та інші вчені. Достатньо висока рідкотекучість міді і здатність змочувати сталеві та інші поверхні дозволяє їй проникати вглиб найменших пошкоджень у металі і щільно заповнювати їх. Відома думка про негативний вплив такого процесу [3] контактування сталі з рідкою міддю (мідними сплавами), що супроводжується міжкристалітним проникненням міді в сталь (МКП). Як результат, тріщини у вигляді «клинів», що мають місце на дефектній поверхні відновлюваної деталі, глибина яких може сягати від 0,01 до 40 мм, заповнюються міддю. На думку цих авторів таке проникнення істотно знижує механічні властивості сталі ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{-1}$ ,  $\delta$ ) і, особливо, пластичні. Механізм МКП пояснюється на основі уявлень про адсорбційне зниження міцності, міжзернову корозію і дифузію під впливом напружень, розклинувальну дію рідкої міді [4].

Тріщини при наплавленні міді на сталь утворюються в результаті спільної дії рідкої міді, яка проникає в мікронадриви, що виникають при кристалізації матричної фази – сталі (ефект Ребіндера), і термічних напружень розтягу. Необхідною умовою виникнення цього ефекту є наявність змочування стінок капіляра-тріщини. З двох фаз, присутніх в розглянутих сталях, рідка мідь змочує аустеніт ( $\gamma$ -фазу) і не змочує ферит ( $\alpha$ -фазу). Визначено, що розклинувальний тиск рідкої міді на сталь становить приблизно 25 МПа.

Проникання міді в сталь на глибину від декількох мікрометрів до декількох десятків міліметрів при наплавленні, зварюванні і паянні відзначено в роботах [5–7]. При цьому допускається глибина проникнення, що не впливає на механічні властивості сталі, обмежується 0,3–0,5 мм. Вважають, що на проникання міді в сталь при наплавленні, зварюванні, паянні впливають такі фактори: час контактування розплавленої міді зі сталлю, із збільшенням якого збільшується глибина проникнення; напружений стан металу при наплавленні, зварюванні і паянні; структурний стан, хімічний склад сталі.

Інститутом проблем матеріалознавства НАНУ [8] запропоновано принципову схему комбінування зварювання внапуск і паяння. Вона полягає в розміщенні паяльного матеріалу

між листами безпосередньо в зоні дії зварювальної дуги. Зварювання відбувається по крайках листів з одночасним розплавленням припою. Авторами отримано авторське свідоцтво, проте подальшого розвитку цей напрямок не набув.

Метою даної роботи є дослідження процесів відновлення та зміцнення сталевих конструкцій шляхом використання комбінованого зварювання з використанням припоїв на основі міді.

Підсилення та ремонт ділянок металоконструкцій із зародженими тріщинами можливе шляхом приварювання додаткових елементів [9]. Така технологія ремонту забезпечує підвищення міцності конструкції, але її недоліком є ослаблення металу в зоні температурного впливу та зменшення у цій зоні корозійної стійкості. Один із способів усунення таких недоліків полягає у використанні технології, яка поєднує процеси зварювання та паяння [10]. Технологія передбачає використання припоїв з необхідною температурою плавлення для підвищення міцності зварних з'єднань внапуск, а також підвищення корозійної стійкості навколошовної зони. Особливістю є те, що припой встановлюється між основними елементами, які зварюються, та розплавляється за рахунок теплоти від процесу зварювання, яка збільшує температуру навколошовної зони (рис. 1).

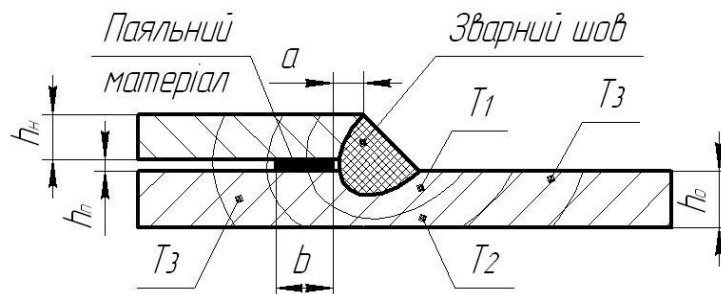


Рис. 1. Спосіб зварювання внапуск

Попередніми дослідженнями [11] встановлено, що відновлення та зміцнення металоконструкцій шляхом заліковування пошкоджень сплавами на основі міді забезпечує гальмування тріщин, істотно збільшує їх живучість.

Допустимий зазор між деталями, що зварюються внапуск, регламентується стандартами, залежить від товщини деталей і може становити до 2 мм. Відповідно до цього необхідно використовувати смужки паяльного матеріалу із товщиною, що не перевищує 2 мм.

В ході експериментальних досліджень не завжди вдавалось досягти повного розплавлення паяльного матеріалу теплом, що поширюється від зварювальної ванни. Встановлено, що максимальна ширина смужки, яку можливо розплавити в процесі зварювання, суттєво залежить від потужності дуги, температури плавлення матеріалу припою, геометрії деталей (товщини стінок металоконструкції і елементів підсилення тощо), а також і від просторового положення електроду відносно деталей в процесі зварювання.

Дослідження впливів вищевказаних параметрів проводили з використанням пакету прикладних програм (ППП) кінцевоелементного аналізу [10]. Одним із найбільш інформативних способів виведення результатів моделювання є температурні поля, значення і характер поширення яких дає можливість робити висновки про максимальну кількість паяльного матеріалу, що може бути розплавлений в заданих умовах.

Для прикладу розглянемо модель приварювання накладки товщиною 5 мм до основи товщиною 7 мм. Товщина смужки припою (в заданій моделі) при цьому становить 1 мм, потужність зварювання 37 Вт/мм<sup>2</sup>. Зварювання проводили електродом діаметром 4 мм на постійному струмі прямої полярності під кутом  $\alpha = 45^\circ$ . Поперечний переріз, що проходить по зварній ванні, вказує на характер поширення температурного поля від зони зварювання (рис. 2, а) перпендикулярно до зварювального шва. Цей переріз температурного поля не повністю визначає допустиму ширину смужки припою, оскільки швидкість його розповсю-

дження не дорівнює швидкості зварювання. Коректним є використання для цього додатково побудованих ізотерм квазістаціонарного температурного поля на горизонтальному перетині А-А, що проходить по осі пластинки паяльного матеріалу (рис. 2, б).

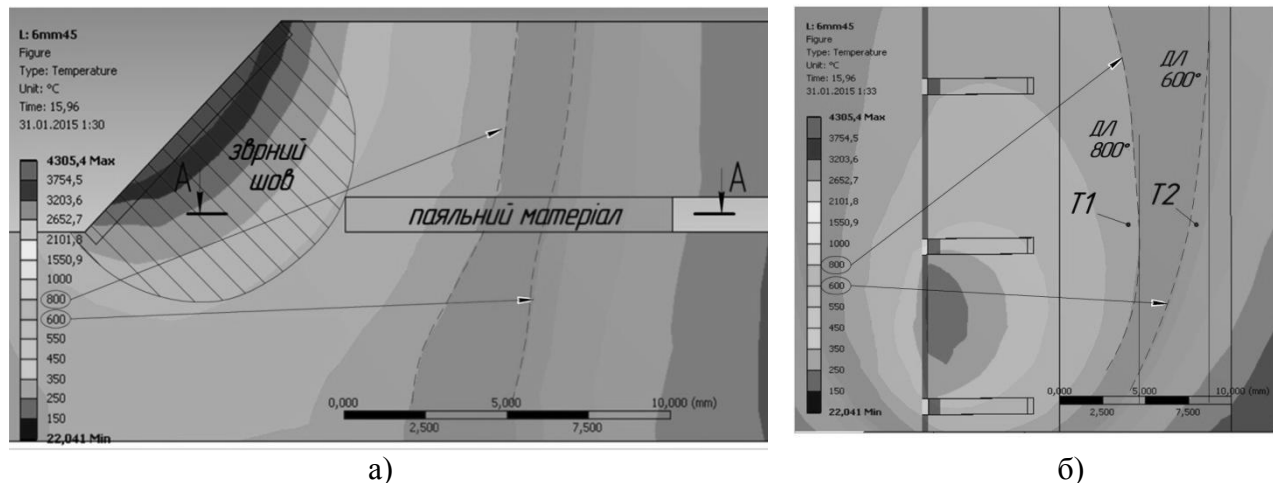


Рис. 2. Температурне поле процесу зварювання з нанесеними ізотермами:  
 а) поперечний переріз; б) горизонтальний переріз А-А

Рациональну ширину смужки припою можна визначити, використовуючи його основні теплофізичні характеристики (температура плавлення, теплопровідність, температуропровідність, теплоємність) [6]. У даному дослідженні використовуємо паяльний матеріал з температурами плавлення 800 та 600 °С. Побудуємо дотичні до ізотерм температур плавлення (рис 2, б), які мають бути паралельними до осі пластини паяльного матеріалу. Ширина смужки паяльного матеріалу повинна бути в межах від границі зварного шва до відповідної дотичної. З врахуванням масштабу визначаємо ширину пластинок припою. Для припою з температурою плавлення 800 °С ширина становить 4,2 мм, а 600 °С – 7,6 мм в умовах дотримання вищевказаних параметрів. Для розплавлення паяльного матеріалу, окрім необхідної температури, потрібен час, за який в нього надійде потрібна кількість теплоти. Для його визначення побудуємо термограми нагрівання пластинки припою в процесі зварювання для найбільш віддалених відносно зварного шва точок Т1, Т2 (рис. 3). За наведеними термограмми, окрім максимальної температури, можна визначити час перебування паяльного матеріалу в певній області температур. Для припою з температурою плавлення 800 °С він визначається з проміжку між лініями І і ІІ (рис. 3) та становить 10 с.

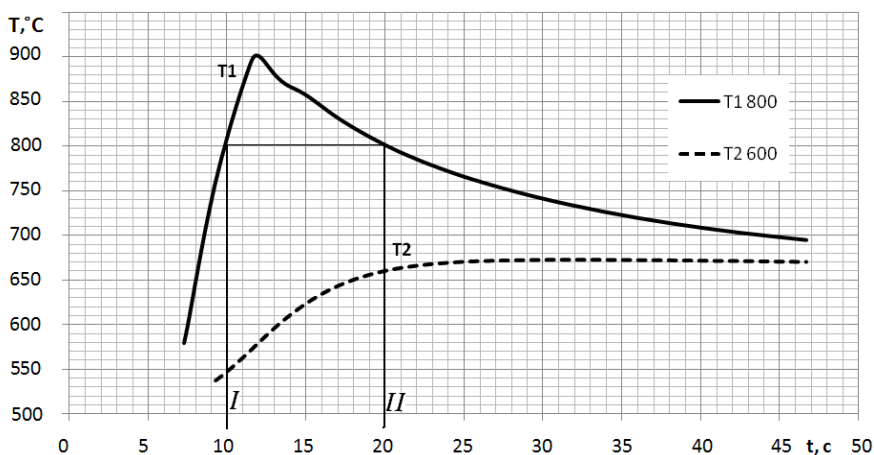


Рис. 3. Термограми точок Т1, Т2

Для визначення запасу міцності зразків, з'єднаних за описаною вище технологією, нами проведено випробування на розривній машині. Оскільки чітких стандартів щодо проведення випробувань зварних з'єднань внапуск знайдено не було, вирішено використати відомі методики випробувань, що подібні з умовами роботи конструкції, описані в [11].

В результаті випробувань на зсув встановлено, що руйнування усіх зразків відбувалось поза зварним швом та зоною запаювання, у зоні температурного впливу. У випробуваннях на позакентральний розтяг виявлено, що руйнування місця запаювання має в'язкий характер, відбувається по криволінійній поверхні і в деяких місцях проходить по основному металу деталі без руйнування припою, що свідчить про високу міцність такого з'єднання.

Разом з тим при використанні такої технології для ремонту не виключена можливість попадання мідного припою в зварний шов. Дослідженням впливу такого легування зварного шва на зміну механічних властивостей з'єднання приділено досить багато уваги. У розглянутих роботах [3–7] наведена узагальнена інформація, яка вказує на погіршення механічних властивостей із збільшенням частки міді у зварному шві, проте не розкриває повної картини впливу такого легування на конкретні показники міцності. З іншого боку є ряд робіт які вказують на позитивний вплив легування міддю на залізобуглецеві сплави [2, 10–11].

Така інформація є досить важливою для реалізації зварювання-паяння, оскільки потрібно знати чи компенсується підвищення крихкості зварного шва в результаті попадання до нього припою за рахунок адгезії, що виникає при розплавленні припою в навколошовній зоні біля кореня шва.

В даній роботі виконані дослідження впливу вмісту міді в шві на ударну в'язкість зварених зразків. Легування шва забезпечували шляхом розміщення мідного припою у вигляді смужки між зварними деталями, яка в процесі зварювання розплавлялась (рис. 4). Кількість розчиненої міді у зварному шві регламентувалась шириною пластинки припою.

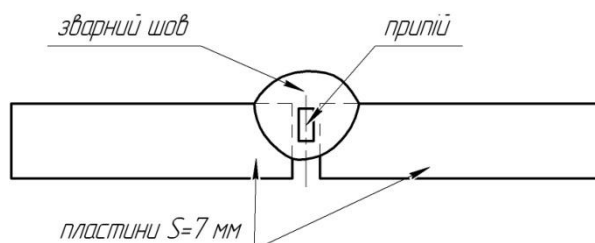
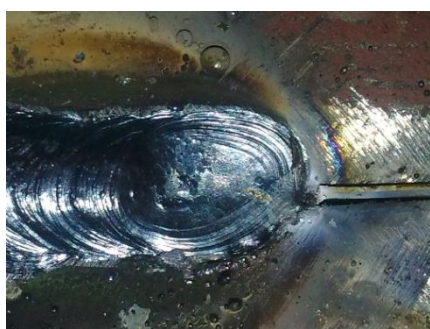


Рис. 4. Схема легування шва

Зварювання проводили на прямій полярності електродом УОНИ 13/45 та в середовищі вуглекислого газу дротом св 08Г2СА. Наявність мідного припою не спричиняло негативного впливу на процес зварювання. Проведено дослідження кратерів, що навмисне не заварювались при ручному дуговому зварюванні (рис. 5, а) і напівавтоматичному в середовищі  $\text{CO}_2$  (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. Кратер зварного шва:

а) ручного дугового зварювання; б) напівавтоматичного в середовищі  $\text{CO}_2$

В їх центрах виявлено наявність поодиноких дефектів (пор, дрібних тріщин), у місці виходу припою при ручному дуговому зварюванні та магістральних тріщин, що заходили на певну відстань в зварний шов при напівавтоматичному зварюванні в середовищі  $\text{CO}_2$ . Тому подальші випробування зразків, заварених в середовищі  $\text{CO}_2$ , не проводились.

Після зварювання проводили виготовлення зразків для визначення ударної в'язкості, та супутньо проводили макроаналіз поперечного перерізу зварних швів, який показав повне розплавлення припою у зразках з вмістом міді до 2% (рис. 6, а). На межі 2% виявлено ледь помітне випотівання міді біля кореня шва (рис. 6, б). Із збільшенням частки міді її надлишки накопичуються в корені шва, заповнюючи зону непровару (рис. 6, в). На всіх зразках не виявлено дефектів.

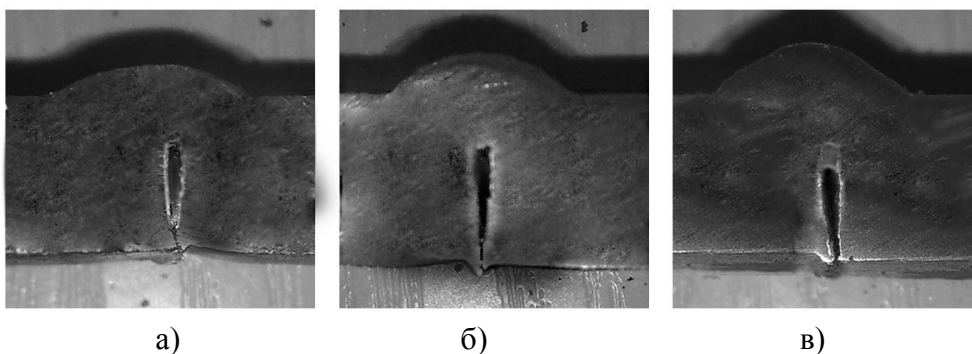


Рис. 6. Макрошліфи швів з часткою припою у зварному шві:  
а) 0,68%; б) 2,05%; в) 4,09%

Випробування на ударну в'язкість зразків, заварених ручним дуговим зварюванням, проводилися на маятниковому копрі моделі 2010 КМ - 30 з енергією удару 300 Дж. Усереднені значення ударної в'язкості для зразків, заварених без припою та з різною кількістю припою, наведено на графіку (рис. 7) Із збільшенням частки припою у зварному шві до 1,36% відбувається зменшення ударної в'язкості. Проте із подальшим збільшенням частки припою показники ударної в'язкості зростають.

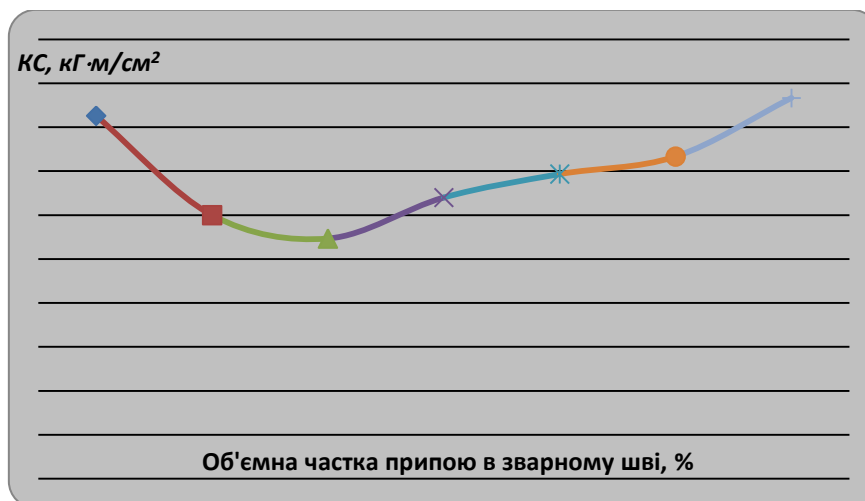


Рис. 7. Залежність ударної в'язкості зварного шва від об'ємної частки припою у ньому

Кількість введеного припою обмежувалась можливістю його повного розплавлення. При повторенні експерименту із збільшенням вмісту мідного припою до 8% руйнування відбувалось не по зварному шві, а по зоні термічного впливу. Значення ударної в'язкості за результатами випробувань коливалося в межах 4,5–5,5  $\text{кГ}\cdot\text{м}/\text{см}^2$ .

Додаткових досліджень вимагає необхідність встановлення оптимальних розмірів «вставок» міді, що впливають не тільки на можливу зміну концентрації частки міді у матеріалі зварного шва, а і на його макрогеометрію (ширину, глибину проплавлення, висоту підсилення) та механічні властивості. Такий вплив встановлений попередніми дослідженнями, що підтверджується макрошліфами (див. рис. 6). Видно, що збільшення розмірів мідної вставки забезпечує зростання тепловідведення із зони зварювання, що призводить до зменшення глибини проплавлення та збільшення висоти підсилення.

### ВИСНОВКИ

Реалізація комбінованого зварювання з використанням припоїв на основі міді не виключає можливості попадання мідного припою в зварний шов. Проведеними випробовуваннями встановлено, що наявність мідних припоїв не погіршують процес зварювання та формування зварного шва, проте дещо змінює його механічні властивості, зокрема ударну в'язкість.

Після досягнення порогу розчинення міді в металі зварної ванни вона починає скупчуватись в корені зварного шва, підвищуючи його міцність.

Відновлення та зміцнення сталевих конструкцій шляхом використання комбінованого зварювання з використанням припоїв на основі міді, окрім підвищення міцності такого з'єднання, забезпечує корозійний захист зони термічного впливу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Максапетян Г.В. *Определение напряженного состояния рам грузовых автомобилей при различных кузовах* / Г.В. Максапетян, Г. Дж. Кочинян // *Сборник научных трудов АрмСХИ*. – 1977. – Вып. XXVIII. – С. 112–115.
2. Савуляк В. І. *Поєднання зварювання та паяння для ремонту рам транспортних засобів* / В. І. Савуляк, С. А. Заболотний, Д. В. Бакалець // *Проблеми трибології*. – 2014. – №3(73). – С.17–21.
3. *Сварка меди со сталью в среде углекислого газа* / Н. Г. Лосицкий, В. Я. Глушко, А. Е. Митус [и др.] / *Химическое и нефтяное машиностроение*. – 1973. – № 6. – С. 26–28.
4. *Сварка разнородных металлов и сплавов* / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. – *Машиностроение*, 1984 г.
5. Вайнерман А. Е. *О влиянии проникновения медного сплава на свойства соединений, получаемых наплавкой сплавов на сталь* / Вайнерман А. Е // В кн.: *Наплавка металлов*. – Л.: ЛДНТП, 1970. – Ч. II. – С. 25–35.
6. Грудзинский Б. В. *О взаимодействии расплавленной меди со сталями при наплавке и сварке* / Б. В. Грудзинский, И. А. Шлямнева, Г. А. Степанов // *Сварочное производство*. – 1970. – № 12. – С. 10–12.
7. Рабкин Д. М. *Сварка разнородных металлов* / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – Киев: Техника, 1976. – 208 с.
8. Пат. 21033 Україна, МПК В23К 9/23 (2006.01). *Спосіб нерозємного з'єднання металічних конструкцій елементів зварюванням плавленням* / Кльонишев В. В., Колодяжний А. В., Головня В. В., Маштаков М. М. – № и 201300304. – Заявл. 09.12.1992; Опубл. 07.10.1997. Бюл. № 10 – 4с.
9. Бакалець Д.В. *Підвищення надійності та відновлення металоконструкцій транспортних та сільськогосподарських машин* / Д.В. Бакалець, В.І. Савуляк // *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія Технічні науки*. – 2012. – Випуск 11(66). – Т. 2. – С. 302–306.
10. Savulyak V. I. *Improvement of strengthening and repair of frame structures welding methods* / V. I. Savulyak, S. A. Zabolotniy, D. V. Bakalets // *Tehnomus «New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies» journal / Romania*. – 2013. – №20. – S. 189–192.
11. Савуляк В.І. *Вплив заліковування тріщин мідними сплавами на міцність сталевих конструкцій* / В.І. Савуляк, Д.В. Бакалець // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2012. – №4. – С.172–175.