

- Рівне. НУВГтаП, 2013. Вип.25. – с.61-70.
6. Морковская Н. Г. Методика экспериментальных исследований влияния способа подготовки металла на прочность соединения сталь-бетон. Тез.докл.ХХХV науч.-техн.конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников. ХНАГХ, ч.1.-Харьков, 2010.- С. 21-25.
  7. Морковская Н. Г. Технологические факторы ,влияющие на прочность безанкерного соединения сталь-бетон акриловыми клеями. НТС «Коммунальное хозяйство городов». Вып.43.-К.: Техніка,2002. – с.79-85.
  8. Золотова Н.М., Гарбуз А.О., Омоноличивание рабочих стыков сборных железобетонных элементов акриловыми клеями. XI международная научно-техническая интернет-конференция «Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве». - г.Харьков , 2013.
  9. Торкатюк В.І., Золотова Н.М., Морковская Н. Г. Количественный состав бригады и необходимое количество механизмов для выполнения работ по соединению старого бетона с новым акриловыми клеями. Научовий журнал «Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури» Вип.34.- Одесса, 2009. – С.89-96.
  10. Золотова Н.М. Пневматическое нанесение акриловых клеев на подготовленную поверхность старого бетона при соединении его с новым. Научовий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2010. – Вип. 58. – С. 104-110

УДК 69.07

**Рюмін В.В., Солодовник Ю.Ю.**

*Харківський національний університет будівництва і архітектури*

### АКТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВУЗЛОВИХ З'ЄДНАНЬ

#### Вступ

Сталевий каркас є однією з основних конструктивних систем у сучасному проектуванні, оцінка його несучої здатності здійснюється, як правило, на підставі розрахунку поперечника (плоскої рами), утвореної вертикальними (колони) і горизонтальними (ригелі) елементами.

В даний час особлива увага приділяється аналізу роботи вузлових з'єднань окремих елементів каркаса, що дозволяє створити економічні конструктивні рішення без зниження несучої спроможності споруди.

#### Актуальність питання

1. Немає класифікації вузлових з'єднань в чинних нормах [1].
2. У нормах Єврокод [2] дана класифікація вузлових з'єднань, однак використання методики, наведеної в цих нормах, є дуже складною.
3. Як відмічається в [3] критерії методики [2] не позбавлені ряду недоліків.

#### Аналіз існуючих підходів до оцінки податливості вузлових з'єднань

За ступенем защемлення всі вузли сполучення балки з колоною можна розділити на:

- шарнірні;
- жорсткі;
- напівжорсткі вузли.

Традиційно вважається, що при шарнірному вирішенні вузлових з'єднань, відбувається передача поздовжніх і поперечних сил з балки на колону, а при жорсткому, окрім поздовжньої і поперечної сил, відбувається передача ще й згинального моменту.

За останні 20 років в практику проектування металевих конструкцій введено поняття напівжорсткий, або частково защемлений вузол рис. 1, який здатний передавати обмежений згинальний момент [3].

Слід зазначити, що межа між трьома видами вузлів умовна. Це пояснюється тим, що в більшості випадків при шарнірному сполученні є деяке защемлення ба-

лки в колоні рис.2, а при жорсткому сполученні - податливість. Наприклад, було показано, наявність часткового защемлення балки в колонах при шарнірному їх сполученні [4]. Разом з тим відмічається, що в рамних вузлах сполучення балки з колоною ще на початкових етапах завантаження з'являються пластичні деформації в елементах вузла [5].

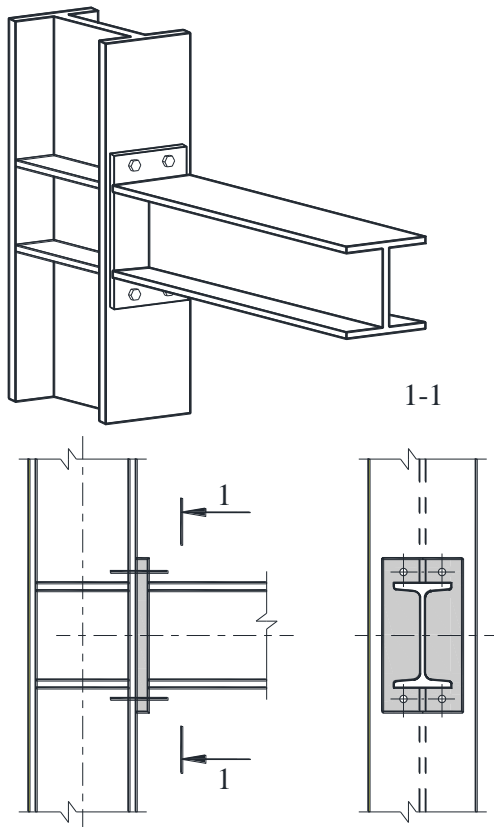


Рис. 1. Загальний вигляд типового вузла

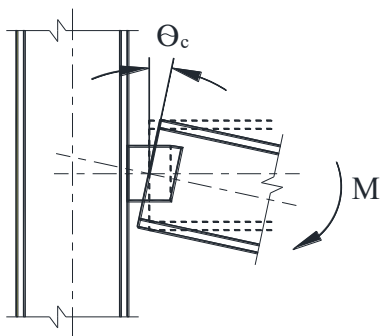


Рис. 2. Кут повороту при деформації з'єднання

На ефективність застосування вузлів з обмеженою згинальною жорсткістю вказують автори робіт [6, 7].

Оцінка податливості вузлового з'єднання здійснюється на підставі діаграми

«момент – кут повороту ( $M-\Theta$ )» рис. 3, отриманої шляхом натурних випробувань вузлових з'єднань, або за даними численних експериментів, наступна обробка даних дозволяє отримати математичну модель роботи вузлового з'єднання.

На підставі аналізу [8-21], можна згрупувати моделі вузлових з'єднань в три основних типи:

- аналітичні;
- математичні;
- змішані.

В аналітичних моделях, співвідношення « $M-\Theta$ » ґрунтується на фізичних характеристиках з'єднань. З іншого боку, в математичних моделях відношення виражається математичною функцією, в якій параметри визначаються відповідною кривою, побудованою за результатами випробувань. Останній тип моделей, змішані, - поєднує і аналітичні, і математичні моделі.



Рис. 3. Діаграма « $M-\Theta$ » для різних умов примикання елементів

### Аналітичні моделі

Рішення аналітичних моделей [8, 9] полягає у визначенні жорсткості з'єднань, яка залежить від конструктивного рішення вузла, і його геометричних параметрів.

При розгляді механізму деформації з'єднувальних елементів для конкретного типу вузла, механічна поведінка останнього може бути представлена різними методами. Загальновизнаним є розробка чисельних моделей вузлових з'єднань, з подальшим їх аналізом в середовищі спеціалізованих програмних продуктів.

Як правило, створюється ряд чисельних моделей, у яких при збереженні зага-

льного конструктивного рішення варіюється ряд певних параметрів, параметри варіювання встановлюються з урахуванням практичного досвіду. Це робиться для оцінки впливу різних геометричних і силових змінних, пов'язаних з компонентами з'єднань.

Основним недоліком числових моделей є те, що кожен тип з'єднань вимагає новий набір формулювань для отримання співвідношення « $M-\Theta$ ».

Крім того, деяка невизначеність, що притаманна для конструктивного рішення з'єднання, може суттєво вплинути на жорсткість з'єднань, які описуються чисельними моделями.

**Математичні моделі**

В даний час найбільш широко використовується підхід, при якому експериментальні криві роботи вузлового з'єднання « $M-\Theta$ » описуються за допомогою простих математичних виразів (1а) або (1б), що зазначається у [10, 13]. Ці вирази називаються математичними моделями, що зв'язують величину згинального моменту з кутом повороту з'єднання ( $M-\Theta$ ). Цей зв'язок здійснюється за допомогою математичних функцій з деякими постійними коефіцієнтами, які визначаються на підставі експериментальних даних.

Отримана математична модель може бути в подальшому використана при статичному аналізі рамної конструкції.

$$M = f(\theta), \tag{1a}$$

$$\text{чи } \theta = g(M), \tag{1б}$$

Основна вимога до гарної математичної моделі - її простота. Однак, незважаючи на вимогу простоти, вона завжди повинна гарантувати побудову плавної кривої з першою додатною похідною, і охоплювати широку область різних типів вузлових з'єднань.

З більшості математичних моделей можна виділити Модель Ричарда –Еббота рис.4.

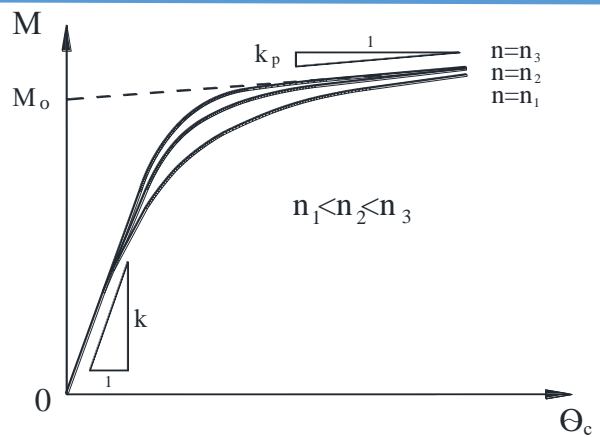


Рис. 4. Модель Ричарда - Эббота

**Змішані моделі**

Змішані моделі [14, 15] являють собою комбінацію аналітичних і математичних моделей. При розробці змішаних моделей функції, які описують поведінку вузлового з'єднання виражаються з урахуванням геометричних параметрів вузлового з'єднання і постійних коефіцієнтів, визначених за графіками « $M - \Theta$ ».

Як і аналітичні, дані моделі враховують геометричні параметри з'єднання, і як наслідок його реальні характеристики, що не властиво математичним моделям.

Дані моделі можуть бути використані для визначення початкової жорсткості окремих видів з'єднань, і відображати нелінійну поведінку з'єднань.

Яскравим прикладом змішаних моделей є модель Рамберга – Озгуда рис. 5.

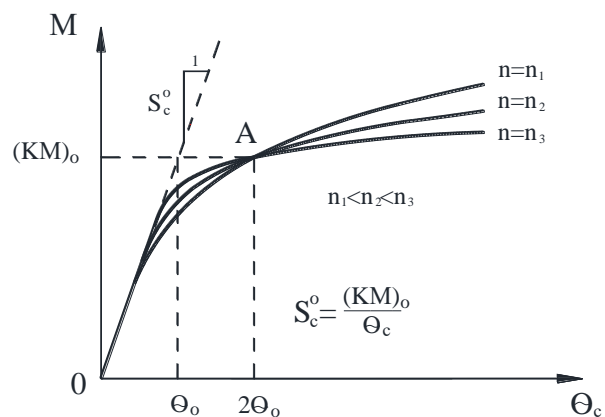


Рис. 5. Модель Рамберга – Озгуда

Діаграму « $M - \Theta$ » роботи вузлового з'єднання, яка побудована за результатами експериментальних даних, автори різних моделей лінеаризують у відповідності до рис.6.

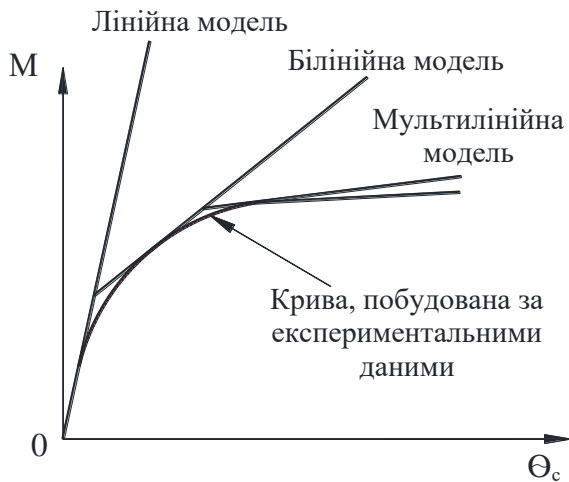


Рис. 6. Лінеаризовані моделі

Існує кілька загальних математичних і змішаних моделей відображення кривої «M - Θ» для з'єднань (табл.1).

Таблиця 1 - Характеристики та опис моделей вузлових з'єднань

Найменування моделі	Опис моделі	Поліном
<b>Лінійна модель</b>	<p>Лінійна модель проста у використанні і вимагає тільки одного параметра, що визначає жорсткість з'єднань.</p> <p>Початкова жорсткість з'єднань, отримана експериментально, є константою всього аналізу без необхідності зміни жорсткості з'єднання. Тим не менш, вона не є точною в широкому діапазоні відхилення і вважається, що повинна використовуватися тільки в лінійному аналізі, де відхилення малі. [16-18]</p>	$M = S_c^o \cdot \theta_c,$ $S_c^o = \frac{\eta}{1 - \eta} \left( \frac{4EI}{L} \right),$ <p>де <math>S_c^o</math> – константа початкової жорсткості з'єднання;  <math>EI</math> – згинальна жорсткість;  <math>L</math> – довжина балки;  <math>\eta</math> – податливість з'єднання.</p>
<b>Поліномна модель</b>	<p>Поліномна модель розглядає метод найменших квадратів, що використовується для визначення константи многочлена моделі. Основним недоліком цієї моделі є те, що жорсткість з'єднання (тобто перша похідна) може бути змінна і від'ємна, що є небажаним з фізичної і чисельної точок зору. [14, 19]</p>	$\theta_c = C_1(KM)^1 + C_2(KM)^3 + C_3(KM)^5,$ <p>де <math>C_1, C_2, C_3</math> - константи кривої;  <math>K</math> – стандартний параметр, що є функцією істотних геометричних параметрів, таких як розмір прилеглого елемента, товщина пластини і т.д.</p> $S_c^o = \left. \frac{dM}{d\theta} \right _{M=0} = \frac{1}{C_1 K}$

<p><b>Модель Рамберга – Осгуда</b></p>	<p>Модель Рамберга - Осгуда була спочатку запропонована для нелінійних відносин НДС, а потім стандартизована. Використовуючи принцип побудови кривих за наявними експериментальними результатами, можна отримати стандартизовані функції «<math>M - \theta</math>».</p> <p>Дана модель вимагає тільки три параметри і може добре являти собою нелінійну і плавну криву. Це досить широко використовується для опису жорсткості напівжорстких вузлів.[20]</p>	$\frac{\theta_c}{\theta_o} = \frac{ KM }{(KM)_o} \left[ 1 + \left( \frac{ KM }{(KM)_o} \right)^{n-1} \right]$ $S_c^o = \frac{dM}{d\theta} \Big _{M=0} = \frac{(KM)_o}{\theta_o}$ <p>где -це параметр, який визначає різкість кривої;  <math>K</math> - коефіцієнт, що залежить від типу з'єднання та геометрії.</p>
<p><b>Модель Ричарда - Эббота</b></p>	<p>Модель Річарда - Еббота - добра фізична модель для напівжорсткого з'єднання, що використовується в даний час як одна з найпопулярніших моделей.</p> <p>Для даної моделі необхідні чотири параметри для визначення кривої «<math>M - \theta</math>», при цьому, жорсткість виходить додатною і обчислення дають хороший результат. [21]</p>	$M = \frac{(k - k_p) \theta_c }{\left[ 1 + \left  \frac{(k - k_p) \theta_c }{M_o} \right ^n \right]^{1/n}} + k_p \theta_c $ $S_c = \frac{dM}{d\theta_c} \Big _{ \theta_o = \theta_c } = \frac{(k - k_p)}{\left[ 1 + \left  \frac{(k - k_p) \theta_c }{M_o} \right ^n \right]^{(n+1)/n}} + k_p$ <p>где <math>k</math> –початкова жорсткість;  <math>k_p</math> – підвищена жорсткість;  <math>n</math> - це параметр, що визначає різкість кривої.</p>

**Висновки**

Лінійні і білінійні моделі прості у використанні, але вони можуть бути занадто грубими і призвести до радикальних змін в жорсткості, що є небажаним з погляду точності та обумовленої стійкості. Поліномна модель здатна забезпечити краще наближення, але може дати небажану від'ємну жорсткість з'єднання. Модель, побудована на підставі кубічного Б-сплайну, може представляти результати точно, але вимагає великої кількості параметрів. Моделі Рамберга-Осгуда Ричарда-Еббота вимагають три і чотири параметри, відповідно, і дають досить гарний збіг. Експоненційна модель Чень-Луи може забезпечити відмінну відповідність

і, принаймні, шість параметрів використовуються в моделюванні.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. - К.: Мінрегіон України, 2014.- 199с.
2. EN 1993-1-8 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints.
3. AliAbolmaali, John H. Matthys, Mohammed Farooqi, Yeol Choi. Development of moment-rotation model equations for flushend-plate connections. Journal of Constructional Steel Research 61 (2005) 1595-1612.
4. Троицкий П. Н., Левитанский И. В. Опорные соединения разрезных балок на вертикальных накладках, привариваемых к

- стенке балки (узлы УНС) / П. Н. Троицкий, И. В. Левитанский // ЦНИИПСК. – М., Стройиздат – 1970. - № 4.
5. Троицкий П. Н., Левитанский И. В. Исследование действительной работы сварного рамного узла крепления и рекомендации по его расчету/П. Н. Троицкий, И. В. Левитанский // ЦНИИПСК. – М., Материалы по металлическим конструкциям - № 19 – 1977.
  6. Павлов А. Б. Основы проектирования стальных строительных конструкций каркасов зданий с учетом реальной изгибной жесткости и прочности узлов соединений их элементов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.23.01. / А. Б. Павлов. – г. Москва, 1996. – 46 с.
  7. Каленов В. В. Экспериментально-теоретическое исследование и совершенствование методов проектирования болтовых монтажных соединений стальных строительных конструкций: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.23.01 / В. В. Каленов. – М., 1995. – 59с.
  8. Youssef-Agha, W., Aktan, H.M. and Olowokere, O.D. (1989): Seismic response of low-rise steel frames. *J.Struct. Div. ASCE* 115(3), 594-607.
  9. Shi, Y.J., Chan, S.L. and Wong, Y.L. (1996): Modelling for moment-rotation characteristics for end-plate connections. *J. Struct. Eng. ASCE* 112(11), 1300-1306.
  10. Richard, R.M. and Abbott, B.J. (1975): Versatile elastic-plastic stress-strain formula. *J. Eng. Mech. Div. ASCE* 101(4), 511-515.
  11. Colson, A. And Louveau, J.M. (1983): Connections Incidence on the Inelastic Behavior of Steel Structural Euromech Colloquium 174.
  12. Lui, E.M. and Chen, W.E (1986): Analysis and behaviour of flexibly-jointed frames. *Eng. Struct.* 8, 107-118.
  13. Al-Bermani, E.G.A., Li, B., Zhu, K. And Kitipornchai, S. (1994): Cyclic and seismic response of flexibly jointed frames. *Eng. Struct.* 16 (4), 249-255.07-118.
  14. Frye, M.J. and Morris, G.A. (1975): Analysis of flexibly connected steel frames. *Can. J. Civil Eng.* 2(3), 280 - 291.
  15. Ang, K.M. and Morris, G.A. (1984): Analysis of three-dimensional frames with flexible beam-column connections. *Can. J. Civil Eng.* 11, 245-254.
  16. Arbabi, E (1982): Drift of flexibly connected frames. *Comp. Struct.* 15(2), 103-108.
  17. Kawashima, S. And Fujimoto, T. (1984): Vibration analysis of frames with semi-rigid connections. *Comput. Struct.* 19, 85-92.
  18. Chan, S.L. (1994): Vibration and modal analysis of steel frames with semi-rigid connections. *Eng. Struct.* 16 (1), 25-31.
  19. Sommer, W.H. (1969): Behaviour of Welded Header Plate Connections, Master's Thesis, Univ. Of Toronto, ON, Canada.
  20. Ramberg, W. And Osgood, W.R. (1943): Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, Technical Report No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC.
  21. Richard, R.M. and Abbott, B.J. (1975): Versatile elastic-plastic stress-strain formula. *J. Eng. Mech. Div. ASCE* 101(4), 511-515.