



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

№3, ТОМ 15 (2009) 209-220

УДК 624.073:621.791.05

(09)-0198-0

## **ОРТОТРОПНІ ПЛИТИ – РОЗВИТОК ТА МАЙБУТНІ ПЕРСПЕКТИВИ\***

**Р. Волчук**

*Инж.-консультант, 921 Bergen Av., Jersey City, NJ 07306, USA*

*E-mail: wolchuk@bellatlantic.net*

*Отримана 22 вересня 2009; прийнята 28 вересня 2009*

**Анотація.** Стаття присвячена загальному огляду сталевих ортотропних плит для мостів, розроблених в Німеччині в 1950-тих роках, а тепер широко вживаних у світовому мостобудівництві. Мала вага та конструктивна ефективність дали змогу їх використання в будівництві мостів з великими прольотами, що раніше було неможливим. Обговорюється питання витривалості й тріщиностійкості ортотропних плит. Тріщини, які виникають у зварних швах, спричинені ефектами виготовлення (дефекти зварювання, залишкові напруження); ефекти знакозмінних напружень є менш важливі. Тому класична пружна теорія витривалості, що базується на дії змінних напружень, непридатна для дослідження тріщиностійкості. Світовий досвід з ортотропними плитами вказує на потребу емпіричного підходу, який вже введений в Єврокодi та інших нормах. Зниження вартості та збільшення ефективності ортотропних плит можна досягти вживанням більших прольотів ребер і спрощенням деталей. Стандартизація та серійне виробництво ортотропних плит здатні забезпечити їх більш широке використання.

**Ключові слова:** ортотропні плити, сталеві мости, витривалість, тріщини, заводське виготовлення, норми для проектування.

## **ОРТОТРОПНЫЕ ПЛИТЫ – РАЗВИТИЕ И БУДУЩЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Р. Волчук**

*Инж.-консультант, 921 Bergen Av., Jersey City, NJ 07306, USA*

*E-mail: wolchuk@bellatlantic.net*

*Получена 22 сентября 2009; принята 28 сентября 2009*

**Аннотация.** . Статья посвящена общему обзору стальных ортотропных плит для мостов, разработанных в Германии в 1950-х годах, а теперь широко применяемых в мировом мостостроительстве. Малый вес и конструктивная эффективность дали возможность их использования в строительстве мостов с большими пролетами, что раньше было невозможным. Обсуждается вопрос выносливости и трещиностойкости ортотропных плит. Трещины, которые возникают в сварных швах, вызванные эффектами изготовления (дефекты сварки, остаточные напряжения); эффекты знакопеременных напряжений являются менее важными. Поэтому классическая упругая теория выносливости, которая базируется на действии переменных напряжений, непригодна для исследования трещиностойкости. Мировой опыт с ортотропными плитами указывает на потребность эмпирического подхода, который уже введен в Еврокоде и других нормах. Снижение стоимости и увеличение эффективности ортотропных

---

\* Ця стаття була надрукована в журналі Stahlbau під заголовком "Orthotrope Fahrbahnplatte-Entwicklungen und Möglichkeiten für die Zukunft" [1]. Тут подається, за дозволом редакції, її український переклад, у скороченому вигляді та з доповненнями автора.

плит можно достичь употреблением больших пролетов ребер и упрощением деталей. Стандартизация и серийное производство ортотропных плит способны обеспечить их более широкое использование.

**Ключевые слова:** ортотропные плиты, стальные мосты, выносливость, трещины, заводское изготовление, нормы для проектирования.

## ORTHOTROPIC DECKS – PAST DEVELOPMENTS AND FUTURE OUTLOOK

R. Wolchuk

*Consulting Engineer, 921 Bergen Av., Jersey City, NJ 07306, USA  
E-mail: wolchuk@bellatlantic.net*

*Received 22 September 2009; accepted 28 September 2009*

**Abstract.** Steel orthotropic decks, first introduced in the 1950s in Germany, are now used in bridges world wide. Their light weight and structural efficiency made possible long span bridges with span lengths that were previously considered unthinkable. Problems of fatigue and safety against cracking are discussed. Cracking at orthotropic deck welds are caused mainly by fabrication effects (defective welds, residual stresses), with effects of fluctuating stresses being of secondary importance. Therefore, classical elastic fatigue theory based on stress range of applied loading is not applicable to assess safety against cracking. Based on experiences with orthotropic deck bridges, an empirical approach is required and has been introduced in the Eurocode and other design specifications for steel bridges. The cost of orthotropic decks may be reduced and their structural efficiency enhanced by the use of longer rib spans and simplification of details. Standardization and serial production of prefabricated deck panels would help to further increase the acceptance and utilization of orthotropic decks.

**Keywords:** orthotropic decks, steel bridges, fatigue, cracking, prefabrication, design specifications.

### 1. Розвиток у минулому

#### 1.1. Історичний огляд

Перші сталеві проїзні плити мостів, скріплені поздовжніми ребрами (т.зв. battledeck floors), були збудовані в США у 1930-х роках. У той же час німецькі інженери пробували вживати тонкі сталеві плити з ребрами для мостів понад новими автодорогами. Економічним стимулом для подальшого розвитку легких сталевих плит цього типу, які діяли як інтегральні компоненти головних конструктивних елементів мостів, була потреба в 50-х роках ХХ ст. відбудувати великопрольотні мости в Німеччині, що були зруйновані воєнними діями. Спочатку вживалися такі "ортотропні" плити з "відкритими" ребрами, потім уведено більш ефективні плити, скріплені "замкненими" коробчастими ребрами. У 1960-х роках у Німеччині збудовано понад 40 мостів цього типу, за ними збудовано подібні мости в інших країнах.

У США цим методом будівництва сталевих мостів зацікавився Американський інститут сталевих конструкцій, який видав у 1963 році підручник для проектування [2], що спирався на спрощену методику німецьких інженерів W. Pelikan, M. Esslinger [3]. Перший ортотропний міст на американському континенті, Port Mann у західній Канаді, був збудований у 1965 році. Перший міст такого типу в США був через р. Міссісіпі у St. Louis (1967). Опісля багато ортотропних мостів збудовано в Японії, Південній Америці та в інших країнах світу. В Україні перший міст такого типу, вантовий міст у Києві з головним прольотом 300 м, був збудований 1976 року [4].

На початку ХХІ ст. було у світі вже кілька тисяч ортотропних автодорожніх і залізничних мостів [5], серед них монументальні підвісні і вантові споруди із довжинами прольотів, які були б неможливі без ортотропних плит легкої ваги, такі як підвісний міст Акаші в Японії

(1991 м) і вантовий міст "Стонкаттерс" в Гонг-Конгу (1018 м).

Взагалі, ортотропні мости працюють задовільно, але у деяких випадках можлива поява тріщин у зварних швах, а також були невдалі застосування захистних настилів на проїзних поверхнях. Причиною були звичайно невідповідні деталі, вживані у початкових проектах та недоброякісне виконання конструкції. Критичний розгляд цих випадків послужив для подальшого розвитку виробництва і застосування ортотропних плит.

### 1.2. Типові деталі ортотропних плит

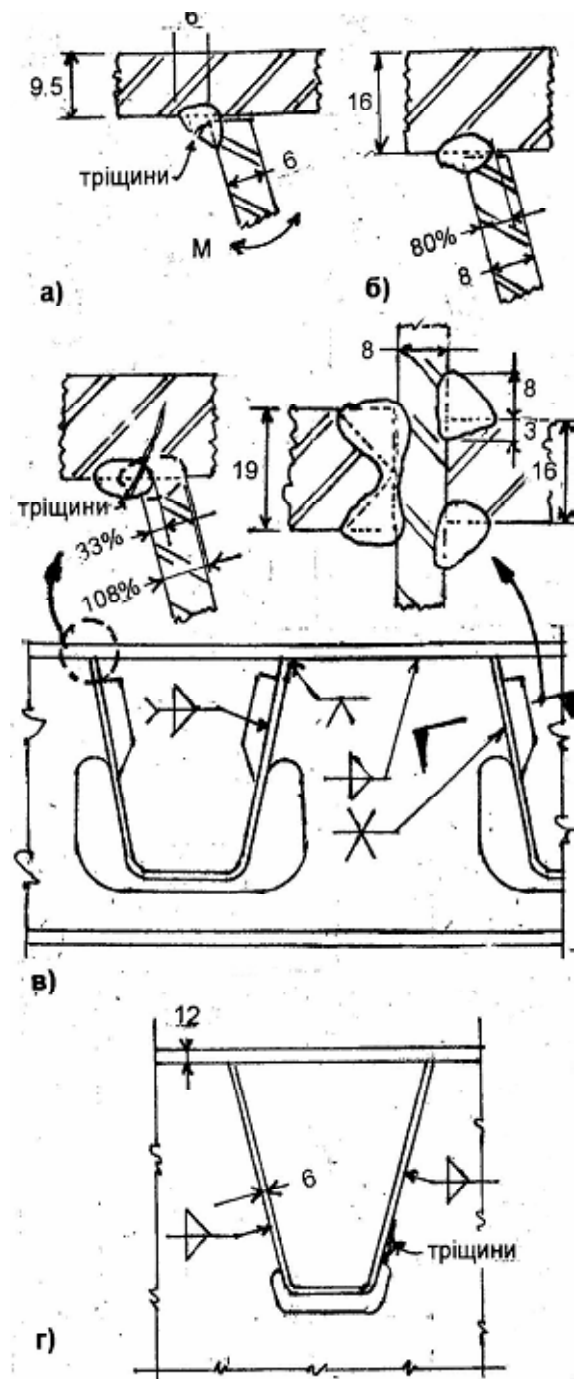
У 60-70-х рр. XX ст. головна увага інженерів була спрямована на максимальну економію сталі, і тому вживалися дуже тонкі сталеві настильні плити та їх ребра. На деяких мостах (Ріо-Нітерой (Бразилія), МекКей (Канада), Северн (Вел. Британія) ужито плити товщиною 9,5-11,5 мм. Ці проїзні плити були дуже гнучкі, що спричиняло локальні прогини, тріщини у зварних швах і руйнування захистних настилів.

Прольоти ребер європейських і японських мостів були звичайно 1,5-2 м для відкритих і 3-4 м для коробчастих ребер. У США й Канаді, де ортотропні плити вживалися для заміни пошкоджених бетонних настилів, прольоти визначалися відстанню між існуючими поперечними балками. Таким чином довжина прольотів складала: 5,5-6,5 м (міст Бен Франклін у Філадельфії, де були вжиті відкриті плоскі ребра з поглубинами), 7,6 м (Голден Гейт, С. Франсіско), 9,8 м (Шамплейн, Монреаль).

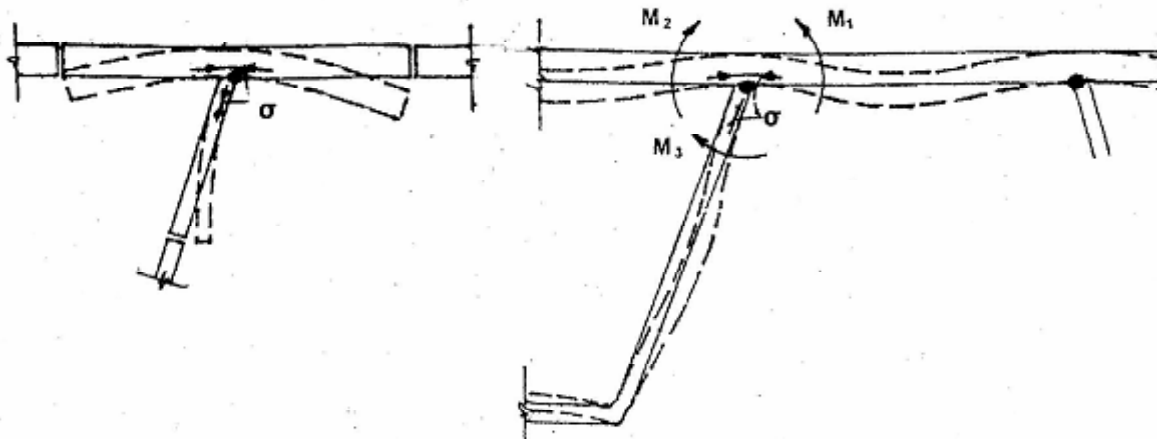
У деяких ранніх проектах скріплюючі ребра приварювалися до стінок поперечних балок, але тоді у зварних швах неодмінно появлялися тріщини. Тому у всіх пізніших проектах ребра були нерозрізні і проходили крізь вирізи у стінках балок.

Ортотропні плити вживаються теж для залізничних мостів, звичайно з рейками на дерев'яних шпалах на стандартному кам'яному баласті, або з рейками, прикріпленими безпосередньо до сталеві плити. Тепер в Європі є вже майже тисяча залізничних мостів цього типу.

Охоронні настили на ортотропних плитах автодорожніх мостів були двох видів: "товсті"



**Рис. 1.** Тріщини в ортотропних плитах: а — кутові шви між ребрами і настильним листом [7]; б — вигоди 80% проплавлення швів [16]; в — тріщини в пробних панелях моста Бронкс-Вайтетон (причини: нерівномірність проплаву [13], високі залишкові напруження розтягнення, спричинені надмірною величиною зварних швів); г — типові тріщини у швах між ребрами і поперечними підпорами (причини: неефективна форма вирізу, дефекти зварювання при співдії рухомого навантаження [8]).



**Рис. 2.** Залишкові напруження і деформації, спричинені зварюванням ребер з настільним листом, та їх вплив на тріщини: а — *спрощене заложення: розріз між частинами настільного листа і стінок*. Скорочення гарячих зварних швів спричиняє прогин настільного листа і стінки ребра; напруження в матеріалі навколо швів є вище межі текучості, отже, деформації залишаються після охолодження швів; б — *справжні відносини: настільний лист і ребра є нерозрізні*. Діючі згинальні моменти у вузлі, залежні від згинальної жорсткості листа і ребер, зменшують прогини, але збільшують видовження розтягу нижньої поверхні настільного листа, де матеріал уже є в стані текучості. Скорочення матеріалу коло швів в наслідок охолодження спричиняє високі напруження розтягнення і тріщини. У стельовій поверхні настільного листа діючі моменти  $M_1$  і  $M_2$ , що спричиняють залишкові напруження стискання.

(60-75 мм), звичайно бітумні, і "тонкі" (6-20 мм) епоксидні, або поліуретанові. Настили мають важливу функцію охорони сталеві плити від корозії та від пошкодження рухомим навантаженням. Для цього настил мусить бути інтегральною частиною сталеві плити, з якою він мусить бути зчеплений з відповідною міцністю на зріз. Пошкодження цього зчеплення неухильно веде до руйнування настилу, з прикрими довготривалими перебоями дорожнього руху. Такі аварії (на мостах Ріо Нігерой, Северн, Гонг-Конг), причиною яких було вживання надто тонких настільних плит, показали потребу збільшення жорсткості настільних плит для зменшення локальних прогинів під важкими колесами вантажних машин. Проблеми захисних настилів і забезпечення їх надійності ширше дискутуються у статті автора [6].

## 2. Тріщини в ортотропних плитах

### 2.1. Дві основні причини

Європейські студії виявили, що основними причинами тріщин у ортотропних плитах є: ефекти процесів виготовлення та рухоме навантаження, причому ефекти виготовлення

відіграють вирішальну роль. У більшості випадків потенційна тріщина внаслідок нерегулярності чи включення у зварному шві, чи при іншому дефекті виготовлення, активізується інтенсивним місцевим напруженням, спричиненим важким колесом, і тріщина починає зростати. Але комплексні місцеві напруження, які характерні для об'ємно-напруженого стану, залежні від змінного положення навантаження, конфігурації деталі, локальних дефектів матеріалу й інших невідомих факторів, неможливо визначити аналітичними методами. Отже безпеки від тріщин можна досягти тільки вживанням перевірених деталей і методу виготовлення, який рекомендований нормами, що ґрунтуються на практичному досвіді і тестах (див. 4.2).

### 2.2. Ефекти виготовлення і недосконалості матеріалу

Дефекти виготовлення, що спричиняють тріщини, включають:

- Залишкові напруження розтягнення навколо зварних швів, спричинені скороченням матеріалу при зниженні температури швів. Ці напруження є пропорційні до розміру шва (кількість вкладеної теплової енергії) і

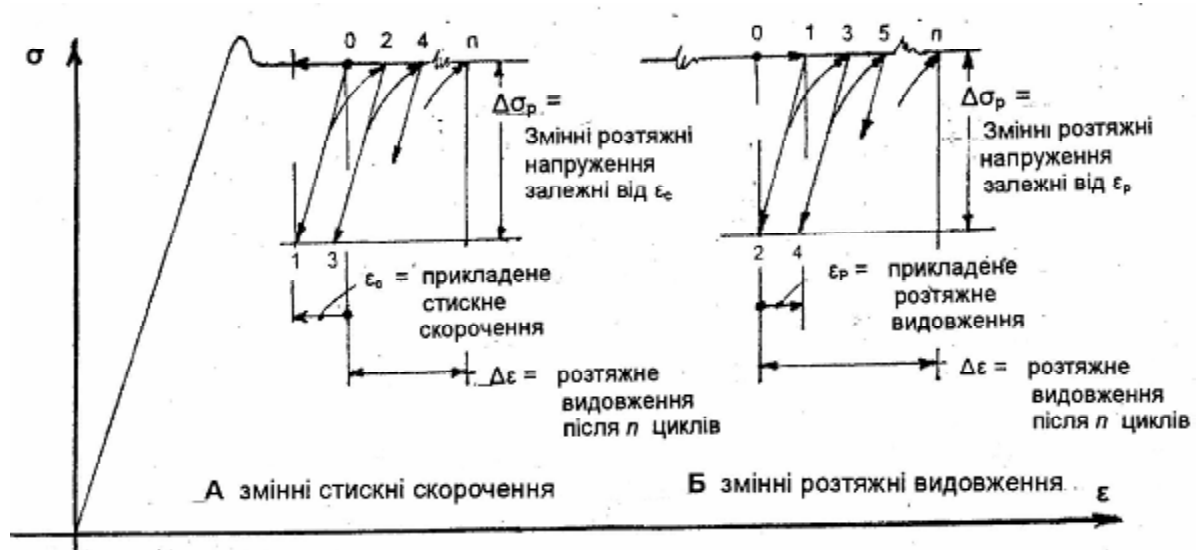


Рис. 3. Можливі залежності між напруженнями і деформаціями у матеріалі у стані текучості, до якого прикладені додаткові змінні скорочення або видовження.

бувають, зокрема, великими, коли зварювані елементи заземлені та не мають можливості вільно видовжуватися чи скорочуватися. У таких випадках тріщини в ортотропних плитах можуть появлятися вже під час їх виготовлення, ще перед їхнім навантаженням на мості. Величина залишкових напружень залежить також від методу і напрямку зварювання, кількості виконаних шарів швів, тощо (див. 3.2.)

- Дефекти зварних швів (шлакові включення, пористість, "кратери" на кінцях швів);
- Завеликі зазори в з'єднаннях зварюваних частин. Для зменшення сил розтягнення внаслідок скорочення швів потрібно, щоб зазори були якнайменші;
- Газове різання матеріалу і вирізання отворів спричинюють термічні зміни в сталі. Ці ефекти можна зменшувати гладким шліфуванням кромок;
- Пластичний стан і подальше твердіння елементів ортотропних плит (напр., холодногнутих трапецієподібних ребер), або термічна правка тонких проїзних плит з метою усунення деформацій, перпендикулярних до площини плити;
- Термічні зміни мікроструктури сталі (зернистість, крупнокристалічна структура) внаслідок текучості сталі в процесі зварю-

вання мають вплив на міцність і текучість. Зниження температури може спричинити крихкість сталі з високим вмістом вуглецю; — Корозія має шкідливий вплив на сприйнятливність сталі до тріщин.

### 2.3. Деталі, в яких часто трапляються тріщини

- а) Зварні шви між стінкою ребра і проїзною плитою. У 1960-х роках вживалися кутові шви з мінімальним проплавленням у стінку ребра. В ексцентричних сполученнях цього типу появлялися тріщини, показані на рис. 1,а [7]. Тепер для цього стику передбачений шов з 80% проплавленням у стінку (рис. 1,б). Вимоги для доброякісного виконання такого шва: 1) щільне припасування стінки ребра до внутрішньої поверхні плити і 2) рівномірність глибини проплавлення з мінімальним відхиленням від 80% (рис. 1,в). Ці проблеми дискутовані ширше на прикладі в 4.2.
- б) Стик між стінкою поперечної балки і ребром. У цій деталі (рис. 1,г) [8] тріщини виникають унаслідок взаємодії локальної концентрації осьових і згинальних напружень у площині поперечної балки і перпендикулярно до неї та дефектів виготовлення (див. 2.2, 5.3).

### 3. Методи для розрахунків міцності та деформацій ортотропних плит

#### 3.1. Спрощені методи

Сталеві плити, скріплені ребрами у двох перпендикулярних напрямках можна математично ідеалізувати як *ортотропно-анізотропні* плити (звідки пішла їх загальноприйнята назва). Треба відмітити, що теорію таких плит перший сформулював у 1914 році професор "Львівської Політехніки" М. Т. Губер [9]. Для розрахунку сталевих мостових плит цього типу в 1950-х роках вживали модифікацію ортотропної теорії, запропоновану Корнеліусом, або теорію "решітки" Гійон-Массоне, але ці методи були дуже ускладнені. В 1957 році В. Пелікан і М. Еслінгер (головний інженер мостобудівельної фірми MAN і його асистентка) запропонували методику придатну до практичного проектування мостових плит з "відкритими" або "замкненими" ребрами, [3] яка спирається на спрощення ортотропної теорії Губера, з урахуванням особливостей обох видів ребер. В результаті, розрахунок плит з відкритими ребрами зводиться до трактування їх як нерозрізних балок, а згинальні моменти у замкнених ребрах є функцією двох основних геометричних параметрів: згинальна жорсткість ребра і "ефективна" жорсткість на крутіння ребер у взаємодії із настільною плитою. "Ефективна жорсткість на крутіння" залежить від геометричних факторів (товщини плит, форми ребер, їх глибини, прольоту, поперечного розміщення, тощо). Величини згинальних моментів подані у діаграмах для різних значень основних геометричних параметрів, прольотів ребер і рухомих навантажень.

#### 3.2. Комп'ютерні методи та їх застосування

Використання комп'ютерних методів в проектуванні структурних систем почалося в 1970-х роках. Від того часу розроблено багато аналітичних програм для розрахунків напружень і деформацій у складних сталевих конструкціях і їх деталях, базованих на методі скінчених елементів, теорії решіток тощо. Такі аналітичні розрахунки можуть бути корисні для перевірки й уточнення висновків, зроблених у початковій фазі проектування. Але для недосвідченого інженера-початківця це вживання готових комп'ютерних програм може швидше перешкодити,

ніж допомогти йому розуміти, як насправді працює конструкція, яку він проектує. Тільки спрощені й прозорі методи аналізу дають можливість проєктантові ясно бачити деформації та величини напружень в компонентах складної конструкції, і тому потрібно перевіряти результати комп'ютерних програм елементарними й наочними методами. Для ортотропних плит таку ясність дає метод [3]. Як влучно сказав один із чільних теоретиків і практиків нашого часу, Др. Й. Шляйх: "Як експеримент, так і комп'ютерні дослідження можуть тільки підтвердити, або уточнити те, що ми вже знаємо. Тому ці методи ніколи не можуть навчити нас що робити, а хіба тільки що ми повинні перестати робити..." [10].

Треба пам'ятати, що всі методи, вживані для аналізу сталевих конструкцій спираються на ідеалізовані характеристики однорідності матеріалу, лінійно-пружну залежність від навантаження, і незмінні від температури й навантаження характеристики матеріалу. Але тонкі компоненти ортотропних плит мають мембранно-подібні прикмети під локальним навантаженням, а навколо зварних швів матеріал є, здебільшого, в пластичному стані, і там аналітичні методи в пружній постановці непридатні.

### 4. Перевірка безпеки від тріщин

#### 4.1. Пружна теорія витривалості та її обмеження

Згідно з класичною теорією витривалості, сформульованою наприкінці 19-го століття Велером (Wohler), тріщини у сталевих конструкціях виникають під дією напружень розтягнення, коли розмах напружень  $\Delta\sigma$  повторюється  $N$  разів, причому критична кількість  $N$  пропорційна до  $(\Delta\sigma)^3$ . Одним з основних положень цієї теорії є те що розмах напружень  $\Delta\sigma$  знаходиться в межах границі текучості сталі. Також треба пам'ятати, що лінійне співвідношення між навантаженням і напруженням є тільки в межах границі пропорційності (яка є нижчою від межі текучості і залежить від сорту сталі). Ці важливі обмеження часто залишаються поза увагою інженерів.

Тріщини в ортотропних плитах найчастіше трапляються у зварних швах, де матеріал напружений, здебільшого, вище межі пропорційності.

Переконливим доказом наявності залишкових напружень такої величини навколо зварних швів є деформації настільного листа і привареної до нього стінки ребра (рис. 2,а). Залишкові напруження можуть радикально змінити розподіл, величину і навіть напрям (розтяг, стиск) напружень, одержаних аналізом ефектів навантаження, не беручи до уваги деформацій і напружень, спричинених процесом зварювання (див., наприклад, рис. 2,б). Навантаження парою коліс над цим вузлом дає негативний момент у настільній плиті, з напруженням розтягнення у верхній і стискання у нижній частині плити, і ці напруження мали б бути вжиті для розрахунків витривалості класичною методикою. Але деформації цього вузла і великі залишкові напруження розтягнення внаслідок зварювання дають, в результаті, стиск у верхній поверхні плити і критичний розтяг у нижній (і там, у зварному шві, а не у верхній поверхні плити, починаються тріщини). Отже, неухвага до залишкових напружень внаслідок зварювання може довести до помилкових висновків.

Непридатність теорії  $\Delta\sigma-N$  для дослідження витривалості таких деталей очевидна, бо неможливо визначити "розмах напружень" у матеріалі в пластичному стані, де напруження є незмінне, і дорівнює межі текучості сталі. Більш доцільно було б говорити про "розмах видовжень (скорочень)",  $\epsilon$ , але навантаження не є головним фактором, що спричиняє виникнення тріщин.

Хоч механізм тріщин і кінцевого руйнування зварних швів ще повністю не роз'яснений, на рис.3 проілюстровано основні аспекти цього процесу. Згідно з експериментально підтвердженим "гістерезійним циклом" напружень у сталевому елементі [11] під дією деформацій розтягнення або стискання у межах граничних станів текучості, коли розтяг зменшується, залежність між діючою силою і скороченням є прямолінійною (відрізок 1-2 на рис. 3,б). Але коли розтяг повертається до початкової величини, залежність є нелінійною (крива 2-3). Можна припустити, що повторювання цього циклу деформацій веде до кінцевого розриву і руйнування.

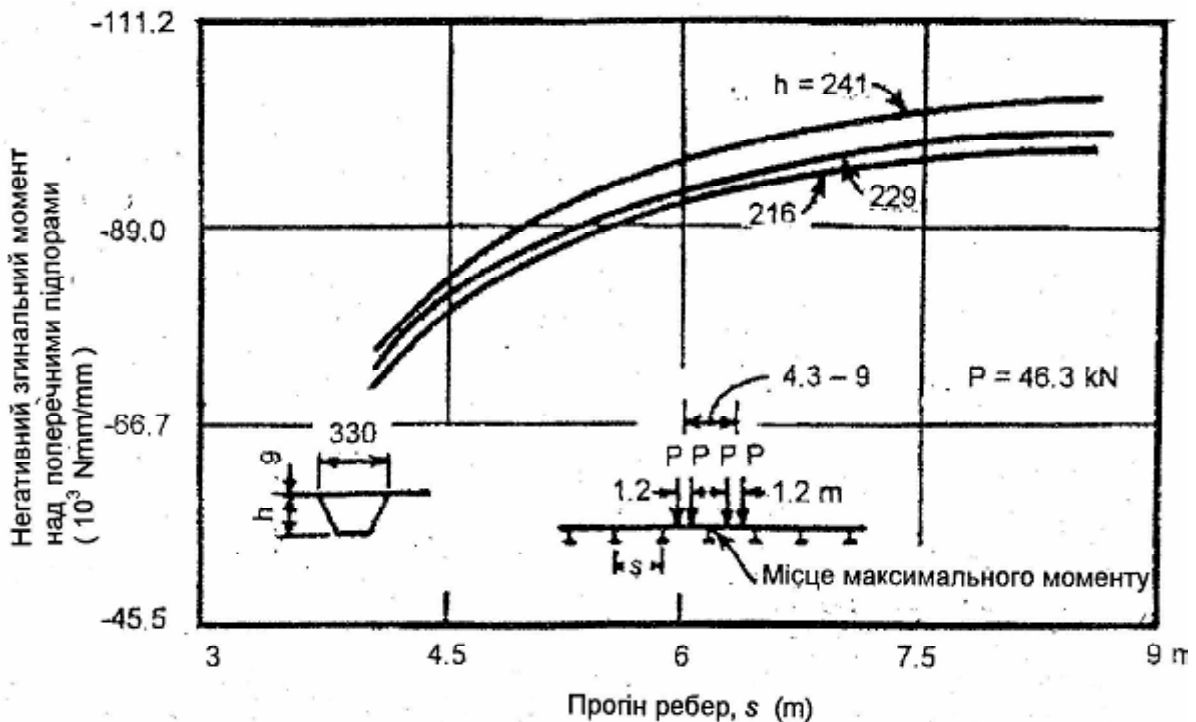


Рис. 4. Залежність між величиною прогону ребер і максимальним згинальним моментом від рухомого навантаження. Товщина настільного листа і поперечне віддалення між ребрами однакове для трьох показаних глибин ребер [18].

Подібний може бути механізм руйнування, коли матеріал знаходиться в граничному стані внаслідок стискальних сил (рис. 3,а). Можливість тріщин в ортотропних плитах внаслідок пульсуючих стискальних сил була показана дослідями в Японії [12]. Цей феномен пояснюється ефектом залишкових сил розтягнення навколо зварних швів.

#### 4.2. Повчальний приклад – тріщини на мості Бронкс-Вайтстон

Типові деталі нової ортотропної плити на вищому мості Бронкс-Вайтстон в Нью Йорку показані на рис. 1,в. Як і в інших проектах, де залізобетонну плиту треба було замінити ортотропною, невелика відстань між проїзною поверхнею і верхом існуючих поперечних балок не дозволяла використати стандартну розв'язку (рис. 5,а) яка вимагає більшої глибини. Аналітичні розрахунки витривалості класичним методом показали дуже великі розмахи напруження в низьких діафрагмах над поперечними балками у їх перетинанні з ребрами. Для зменшення цих напружень від навантаження, проектувальники скоротили прольоти ребер до 3 м, вставляючи додаткові поперечні підпори поміж існуючими поперечними балками на відстані 6 м. Товщину діафрагм збільшено до 19 мм, а для підвищення жорсткості стінок ребер приварено додаткові внутрішні скріплення. Для підтвердження витривалості цієї конструкції типова панель була тестована у дослідному інституті Лігайського університету. Несподівано під симульованим дорожнім навантаженням з'явилися тріщини у зварних швах між ребрами та проїзним листом у перерізах із поперечними підпорами (рис. 1,в). Обстеження панелі виявило, що глибина проплавлення цих швів замість 80%, згідно з нормою, коливалась у межах від 33% до 108%. Все-таки, на думку проектувальників, "дефекти проплавлення не були шкідливі для витривалості" [13], а причиною тріщин помилково визнано "завелике навантаження" (3.4 разів більше від нормативного), яке було прикладене для прискорення тестів. Для підтвердження цього висновку дефекти проаналізовано "витонченими методами теоретичної механіки" і прогнозовано "81-річну витривалість" під нормативним

дорожнім навантаженням. Але тріщини у швах між ребрами і проїзним листом з'явилися в ортотропній плиті вже протягом першого року після її конструювання (2006).

Розгляд пошкоджень ортотропних плит на цьому мості показав, що тріщини виникли коло перетинів ребер з настільним листом і стінкою поперечних балок, тобто в місцях, де зварювані

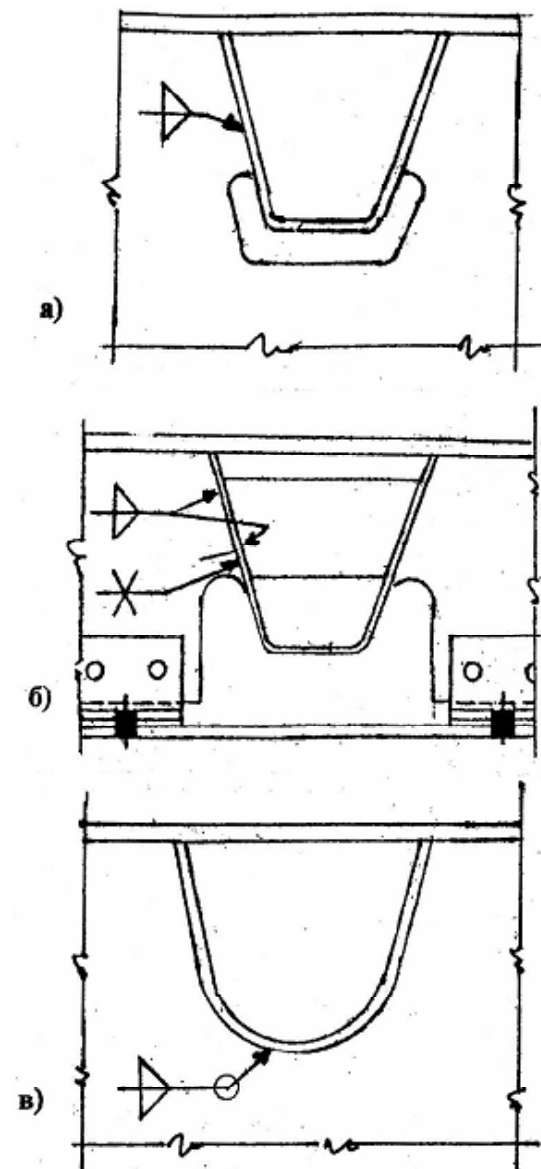


Рис. 5. Перетинання ребер із поперечними балками: а – переріз з вирізом навколо ребра знизу; б – переріз, що застосовувався коли глибина ортотропної плити була обмежена; в – переріз без вирізу навколо ребра знизу.



елементи є тісно защемлені і не можуть вільно скорочуватися під час охолодження зварних швів від температури текучості сталі до температури доквілля. Залишкові напруження розтягнення, які виникають в таких обставинах є в прямій залежності від кількості теплової енергії вкладеної у матеріал процесом зварювання, тобто від кількості й величини перерізу швів. На рис. 1, в показано скупчення зварних швів великої товщини "повнопроплавного" і "комбінованого" типу в верхньому кінці "зуба" діафрагм між ребрами, які спричиняють великі залишкові напруження розтягнення у вертикальному, поперечному й поздовжньому напрямках. Власне коло перетинів діафрагми з ребром і настільним листом почалися тріщини. Великий розмір швів був результатом надмірного потовщення діафрагми, що проектувальники вважали потрібним для зменшення розмаху напружень від дорожнього навантаження. Але, залишкові напруження від зварювання були багато більшого порядку. Величину залишкової розтяжної сили у цих швах можна приблизно визначити як 2000 кН методом, поданим в [14]. Для порівняння, у звичайно вживаній деталі такого перетину, для 6 мм кутових швів між 12 мм діафрагмою і стінкою ребра, і без додаткових скріплень в середині ребер, залишкова сила розтягнення в цьому шві була б тільки 400 кН, отже у п'ять разів менша. Отже, засоби, задумані для збільшення тріщиностійкості, дали набагато більші залишкові напруження, і, в результаті, зменшили тріщиностійкість цієї деталі.

Ремонтні роботи (за кошти виконавця роботи, хоч відповідальність тут більше на боці проектувальників) ще не закінчені. Невдача цього проекту показує, що покладання на академічну теорію, придатність якої є обмежена, без доброго розуміння дійсних фізичних процесів, яких зазнають тонкі сталеві елементи під час виготовлення й зварювання, неухильно доводить до фатальних результатів. Це була коштотворна лекція для власників моста, проектувальників і виконавця роботи.

#### 4.3. Емпіричне забезпечення безпеки від тріщин

Тому що тріщини в ортотропних плитах виникають здебільшого внаслідок ефектів виготов-

лення, які неможливо передбачити чи аналізувати, а теорія витривалості, що базується на розмаху напружень, непридатна для зони навколо зварних швів, де матеріал є поза межами пружності, новіші норми для проектування передбачають емпіричну оцінку витривалості для деталей ортотропних плит. Для цього рекомендуються геометричні параметри (товщина плит, розміщення ребер) та методи зварювання, і витривалість вважається задовільною без аналітичних розрахунків, коли конструктивне рішення відповідає цим вимогам.

**Єврокод** [15] не вимагає чисельних розрахунків витривалості для ортотропних мостів стандартного типу з деталями, які задовольняють вимоги і рекомендації цих норм (максимальні відхилення від прямолінійності і плоскості елементів, обмеження зазорів у з'єднаних зварюваних частинах, якість зварних швів).

**Японські норми для проектування мостів** [16] пропонують стандартне конструктивне рішення для трапецієподібних ребер і їх зварювання, з проїзною плитою і поперечними балками, які можна вживати без аналітичних розрахунків.

**Американські норми** знаходяться у процесі змін. Видання, що виходили раніше, вживали методику, базовану на розмаху напружень для "витривалості, залежної від навантаження" з дозволеним розмахом напружень для різних "категорій деталей", і рекомендували геометричні параметри для "витривалості, залежної від деформацій" (ця категорія включала сполучення між ребрами і настільним листом). Для таких конструктивних рішень (деталей) не вимагались чисельні розрахунки. У нових (2009) тимчасових нормах [17] "категорії деталей" для ортотропних плит з дозволеними напруженнями вже не пропонуються. Для майбутніх норм розглядаються емпіричні критерії для забезпечення витривалості.

#### 5. Можливості конструктивної оптимізації і зменшення вартості ортотропних плит

##### 5.1. Збільшення конструктивної ефективності ортотропних плит з довгими прольотами ребер

Рис. 4 показує величину максимального негативного згинального моменту в одному ребрі

навантаженому колесами, як функцію довжини прольоту ребра. Як видно, коли прольоти більше за 6 м, зростання величини моменту дуже незначне. Причиною цього є значно більший розподіл навантаження в поперечному напрямі, коли збільшується прольот ребер [18]. Можливість і практичність великопрольотних ортотропних плит була доведена у проекті відновлення моста Шамплейн через р. Св. Лаврентія в Монреалі (Канада), де були вжиті ребра з прольотами 9,8 м [19]. Нова ортотропна проїзна поверхня, побудована в 1993 р., працює задовільно під важким навантаженням.

### **5.2. Зниження вартості через зменшення кількості деталей які вимагають багато робочих годин**

Досвід з ортотропними мостами показує, що вартість кваліфікованої робочої сили для їх виготовлення та зведення становить 75% або більше загальної вартості проекту, тобто ціна матеріалу не має вирішального значення. Отже, зменшення потрібних робочих годин може дати значні заощадження [19].

Найбільш трудомісткими деталями є перетинання ребер із поперечними балками, з комплексними вирізами у стінках і зварними швами, які треба виконувати вручну. Кількість таких дорогих перетинань можна зменшити вживанням більших прольотів ребер і збільшенням поперечної відстані між ними, що вимагає збільшення товщини настільного листа. Для прикладу, 18-метровий по довжині та 11-метровий по ширині компонент ортотропної плити з прольотами ребер 4,5 м і відстанню між ними 0,6 м має 72 перетинання з поперечними балками, але з прольотами 9 м і відстанню 0,9 м кількість перетинань була би 24, отже втричі менша. Дев'ятиметрові прольоти ширше розставлених ребер вимагатимуть збільшення товщини настільного листу з 14 до 18 мм і збільшення висоти ребер з 280 до 380 мм, але збільшення вартості за рахунок незначного збільшення ваги сталі є незначним, у порівнянні з потрібним зменшенням вартості робочої сили.

### **5.3. Заощадження через спрощення конструктивних рішень перетинань**

На рис. 5 показано три типи конструктивних рішень перетинань ребер із стінками попереч-

них балок, які були вживані. Стандартне конструктивне рішення показано на рис. 5,а. Виріз навколо нижньої поверхні трапецієподібного ребра має забезпечити свободу обертання ребра, спертого на поперечну балку, без надмірних додаткових деформацій і напружень у стінці поперечної балки, до якої ребро приварене кутовими швами. Ці шви мусять бути безперервно виконані навколо кінців вирізів, щоб не було шкідливих для витривалості кінцевих "кратерів". Це вимагає ручного виконання і гладкого шліфування кінців швів, як і країв вирізів у стінках поперечних балок.

Конструктивні рішення ортотропних плит, що вживаються для заміни зношених залізобетонних проїзних плит бувають здійснені, коли їх глибина обмежена. Прикладом може бути ортотропне перекриття мосту Вілліамсбург в Нью-Йорку (рис. 5,б). Тут на перехрестях ребер з поперечними балками приварено діафрагми у внутрішній частині ребер для локального скріплення їх стінок. Але, як дискутовано на "ортотропній конференції" в Сакраменто (2004), доброякісне приварювання таких внутрішніх діафрагм практично неможливе. Отже, вони тільки завдають шкоди і збільшують вартість виготовлення, яка, для прикладів, показаних на рис. 1,в і 5,б, була майже вдвічі дорожча, ніж для плит із стандартними деталями. Тут треба згадати, що діафрагми чи додаткові скріплення всередині ребер у площині поперечних балок ніколи не використовували в європейських і японських проектах.

Для нових мостів найбільш ефективний і економічний є переріз ребра з поперечною балкою без вільного вирізу навколо ребра знизу (рис. 5,в). Ребро приварене до стінки поперечної балки безперервними кутовими швами. Обертання ребра на підпорі забезпечує невелика жорсткість на крутіння поперечної балки (ця умова звичайно задовольняється, коли довжина поперечної балки є вдвічі більша від висоти ребра). Для цього варіанта добре підходять ребра з заокругленнями знизу. Ця форма забезпечує щільне припасування периферії ребра до стінки поперечної балки, що є однією з вимог для доброякісних зварних швів. Перерізи цього типу були успішно вживані на мостах у Західній Канаді. Порівняльні тести в університеті в Делфт [20] підтвердили, що цей тип

перерізу має кращу тріщиностійкість, ніж переріз з вирізом (рис. 5 а).

## 6. Можливості для ортотропних плит у майбутньому мостобудівництві

Ортотропні плити малої ваги в першу чергу потрібні для мостів з великими прольотами. Прикладом майбутніх можливостей є висячий міст через Месинську протоку між Італією і Сицилією з головним прольотом 3300 м. Поперечний переріз має три коробчасті балки, дві крайні — для автомобілів, середня — для двох залізничних колій. Цей міст, про який мріяли ще наприкінці 19 століття, мав би служити економічному розвитку Сицилії. Контракт на будову підписано ще в 2005 році, але проект призупинено через фінансові труднощі. Теж закінчене проектування двопрольотного висячого моста Чакао в Чілі, Півд. Америка (1050-1100м). Продовжується будівництво великих мостів у Китаї і Півд. Кореї. В 2009 році розпочато проектування моста через протоку Фемерн у Данії (прибл. 1620 м) і оголошено конкурс для третього транспортно-залізничного моста через р. Тагус у Лісабоні, Португалія.

Поширення застосування ортотропних плит у майбутньому вимагає нових практичних норм, базованих на досвіді. Світове узгодження та координація на міжнародному рівні норм для їх проектування та зведення могло б сприяти розвитку нових можливостей.

Для мостів коротких і середніх прольотів вживання ортотропних плит було б полегшено стандартизацією та серійним виготовленням плит з гарантованою витривалістю, які не вимагали б аналітичних розрахунків (так само, як це можливо для широкоживаних сталевих решіток для мостів чи стандартних балок або плит з попередньо напруженого залізобетону). Такі можливості дискутовані у статті автора [21].

## 7. Подяка

Зміст і рекомендації цієї статті базовані на інформації та обміні думками інженерів і дослідників проблем ортотропних мостів в різних країнах світу. Ця співпраця була започаткована під час конференції по проблемам ортотропних мостів у Сакраменто (2004), де створилася неформальна Група для підготовки вказівок для

проектування й виробництва ортотропних плит, члени якої обмінювалися думками на ці теми протягом кількох років. Автор висловлює подяку в першу чергу проф., д.т.н. Г.Седлячєкові, голові комісії Єврокодів для сталевих конструкцій, за його інформацію, поради й заохочення до підготовки й публікації цієї статті. Подяка висловлюється також проф., д.т.н. Ч. Мікі з Інституту Технології в Токіо, д.т.н. Г. Колстайнові з Технічного Університету Делфт, проф. О. Остапенкові з Лігайського Університету, д.т.н. П. Баклендові з фірми Б-Т, Ванкувер і інж. О. Соренсенів з фірми COWI, Копенгаген за їх інформацію й коментарі. Я теж вдячний д.т.н. К.-Є. Курерові, редакторові "Stahlbau", за дозвіл використати матеріал, надрукований в ч. 7. 2007, для цієї статті в журналі "Металеві конструкції".

## Література

1. Wolchuk R. "Orthotrope Fahrbanplatten-Entwicklungen und Möglichkeiten für die Zukunft" Stahlbau 7/2007.
2. American Institute of Steel Construction "Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges" 1963. Prepared by R. Wolchuk.
3. Pelikan W., Esslinger M. "Die Stahlfahrbahn. Berechnung und Konstruktion" M.A.N. Forschungsheft Nr. 7/1957.
4. Kornijiv M. "Orthotropic Deck Bridges in Ukraine" Orthotropic Bridge Conference, Sacramento, 2004. Presentation OBC-04-05.
5. Wolchuk R. "Steel Orthotropic Decks, Developments in the 1990s" Transportation Research Record 1688, National Academy Press, Washington DC1999.
6. Wolchuk R. "Structural Behaviour of Surfacing on Steel Orthotropic Decks and Considerations for Practical Design" Structural Engineering International 2/2002.
7. Gurney T.R., Maddox S.J. "Fatigue tests on joints in orthotropic decks" British Welding Society Conference 1987. Brighton, U.K.
8. Prof. Sedlacek und Partner "Untersuchung zur nachhaltigen Instandsetzung von ortotropen Fahrbanplatten von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagsystems" FE 15.405/2004 CRB.
9. Huber M.T. "Die Grundlagen einer rationellen Berechnung der kreuzweise bewehrten Eisenbetonplatten" Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereines Vol. 66 (1914) p. 557.
10. Schlaich J. "The Computer between Science and Practice in Structural Engineering" Structural Engineering International 1/1991.

11. Schleicher F. "Taschenbuch fur Bauingenieure." 1955, Vol. I p. 644.
12. Miki C., Fujii Y., Takenouchi H. Ono S. "Compressive Fatigue Strength of Splice Joints in the Longitudinal Stiffener of Bridge Deck" Intern. Institute of Welding, Doc. XIII- 1551-94.
13. Tsakopoulos P.A., Fisher J.W. "Fatigue Resistance Investigation for the Orthotropic Deck on the Bronx Whitestone Bridge - Final Report" ATLSS Report No. 02-05, Lehigh University, Bethlehem PA, Sept. 2002.
14. Young R. W., Elliott P., Bowers, G. "Residual stresses and measurements of tolerances" Proceedings of the Intern. Conference on Steel Box Girder Bridges, The Institution of Civil Engineers, London, 1973, pp. 231-240.
15. Eurocodes: prEN 1993-1-9 Fatigue; prEN 1993-2 : 2004 Steel Bridges.
16. Japan Road Assoc. Specifications for Highway Bridges (2002).
17. AASHTO LRFD 2009 Interim Bridge Design Specifications.
18. Wolchuk R. "Orthotropic Decks with Long Rib Spans" Civil Engineering, 2/1964.
19. Wolchuk R. "Orthotropic Decks with Long Rib Spans" Orthotropic Bridge Conference, Sacramento 2004. Presentation OBC-04-03.
20. Kolstein H. "Fatigue performance of the trough to cross-beam connection in orthotropic steel bridge decks" Nordic Steel Construction Conference '95, Malmo, Sweden.
21. Wolchuk R. "Prefabricating Standard Orthotropic Steel Decks" Modern Steel Construction National Steel Bridge Alliance, Dec. 2006.

**Волчук Роман** — інженер-консультант у Джерсі Ситі, Н.Дж. (США), студії в Технічних вищих школах у Львові (Україна), Відні і Грац (Австрія). Член Американських та інтернаціональних інженерних товариств, Наукового товариства ім. Шевченка, закордонний член Академії будівельних наук України. Наукові інтереси: ортотропні плити, сталеві мости коробчастого типу.

**Волчук Роман** — инженер-консультант в Джерси Сити, Н.Дж. (США), студии в Технических высших школах во Львове (Украина), Вене и Грац (Австрия). Член Американских и международных инженерных обществ, Научного общества им. Шевченко, иностранный член Академии строительных наук Украины. Научные интересы: ортотропные плиты, стальные мосты коробчатого типа.

**Wolchuk Roman** — is a consulting engineer in Jersey City, NJ (USA), engineering education at Technical Universities in Lviv (Ukraine), Vienna and Graz (Austria). Member of American and International Engineering Societies, the Shevchenko Scientific Society, a foreign member of the Academy of Civil Engineering Science of Ukraine. Research interests: orthotropic decks, steel box girder bridges.