

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МАЛЬГІН МИХАЙЛО ГЕННАДІЙОВИЧ**

УДК 624.21

**МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРИВАЛОСТІ ЗВАРНИХ ВУЗЛІВ  
МОСТІВ ЗА ЛОКАЛЬНИМИ НАПРУЖЕННЯМИ**

05.23.17 – будівельна механіка

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2015**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України, а також в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Медведєв Костянтин Володимирович,**  
Національний транспортний університет, професор  
кафедри мостів та тунелів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Луговий Петро Захарович,**  
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка Національної  
академії наук України, завідувач відділу «Будівельна  
механіка тонкостінних конструкцій»

кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник **Шалінський Валерій Володимирович,**  
ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій  
ім. В.М. Шимановського», заступник завідувача відділу  
«Мости та спеціальні споруди»

Захист відбудеться «    » \_\_\_\_\_ 2015 року о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, м. Київ, вул. Суворова, 1, ауд. 333.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42.

Автореферат розісланий «    » \_\_\_\_\_ 2015 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

\_\_\_\_\_

В.І. Каськів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В зварних вузлах конструкцій, які відповідають технічним умовам на їх виготовлення і експлуатацію, в процесі проектних термінів служби виникають тріщини втоми. Для підтримки конструкцій у справному стані розробляються правила їх ремонту та експлуатації. Проблема підвищення надійності елементів залізничних і автодорожніх мостів є однією з найбільш актуальних. Згідно даних Укрзалізниці, на сьогоднішній день приблизно із 300 металевих прогонових будов мостів, що експлуатуються на залізницях України, 100 прогонових будов є дефектними, через наявність в них тріщин втоми. Тріщини втоми у зварних вузлах металевих автодорожніх і залізничних мостів з'являються через 3 – 20 років після початку їх експлуатації. Експлуатація мостової конструкції, із наявністю в її вузлах втомних пошкоджень, може призводити до обмежень в експлуатації і аварійного стану всієї споруди в цілому.

Основною причиною появи тріщин втоми є те, що вже на стадії проектування мостів недостатньо повно враховується фактична робота елементів конструкцій при експлуатаційному навантаженні. Експериментальні та числові дослідження експлуатаційного навантаження елементів мостів показують, що в місцях виявлення втомних пошкоджень може виникати складний локальний напружено-деформований стан (НДС) елементів. Закономірність виникнення складного локального НДС обумовлена двома основними факторами: конструктивним і силовим, а саме особливостями схемно-конструктивних форм вузла і способом навантаження його елементів при експлуатації. Наприклад, навантаження елементів зварних вузлів може характеризуватися тим, що в процесі проходження транспортного засобу по мосту реалізовується просторовий згин елементів, стиснуте крутіння елементів, а також комбінація дії дотичних і нормальних напружень в площині елементів. В залежності від прийнятих схемно-конструктивних рішень вузлів мостової конструкції і положення на ній транспортного засобу, комбінація локальних силових факторів по-різному проявляється в зварних вузлах. У залізничних прогонових будовах мостів, найчастіше, складний локальний НДС виникає в стінках балок, в місцях прикріплення поперечних ребер жорсткості, а в автодорожніх мостах – у вузлах ортотропних плит проїзної частини.

Нормативна модель розрахунку мостів на витривалість не дозволяє врахувати вплив складного локального НДС. Відповідно до норм проектування, розрахунок мостів зводиться до визначення в потенційно небезпечних місцях номінальних (загальних) напружень, що діють в розрахункових перерізах несучого елемента конструкції. Прояв складного локального НДС в елементах не розглядається, що може призводити до неправильного призначення конструктивних рішень зварних вузлів. Тому задача вдосконалення моделі розрахунку зварних вузлів мостів на витривалість, з урахуванням локальної роботи їх елементів, є актуальною і має важливе практичне значення. При вирішенні поставленої задачі важливим є розвиток використання методу скінченних елементів (МСЕ) для визначення локальних змінних напружень в потенційно небезпечних зонах зварних вузлів мостових конструкцій, та їх розрахункових характеристик опору втоми (ХОВ).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні дослідження експериментального, теоретичного і прикладного характеру виконані в рамках науково-дослідних робіт відділу міцності зварних конструкцій Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, а також на кафедрі мостів та тунелів Національного транспортного університету: за темою 3,87/1 «Встановити закономірності зародження і розвитку втомного руйнування зварних з'єднань термічно зміцнених алюмінієвих сплавів та розробити методологію оцінки і подовження ресурсу конструкцій залізничних транспортних засобів з тривалою наробкою» (2010 – 2012 рр.) за номером державної реєстрації 0110U002738; за темою «Проведення досліджень напружено-деформованого стану модернізованих зварюванням елементів проїзної частини металевих залізничних мостів та надання висновків стосовно їх залишкового експлуатаційного ресурсу» (договір 121/10-ЦТех-266/2010-ЦЮ від 29.07.2010 р.); за темою «Розвиток методів комп'ютерного моделювання динаміки пружного тіла під дією рухомого навантаження» (Проект № Ф40. 1/034) за номером державної реєстрації 0111U004923; за темою №3 «Теоретичні засади оцінки ресурсу транспортних споруд» (2011 – 2013 рр.) за номером державної реєстрації 0111U000095.

**Мета дослідження** полягає в розробленні моделі розрахунку зварних вузлів сталевих мостів на витривалість із врахуванням локального напружено-деформованого стану в потенційно небезпечних зонах.

**Задачі дослідження.** Для досягнення поставленої мети були вирішені такі задачі:

- виконати аналіз сучасного стану проблеми втомної довговічності зварних вузлів металевих мостів;
- розробити скінчено-елементну модель для розрахунку локальних змінних напружень в зварних вузлах мостів;
- розробити модель призначення розрахункових характеристик опору втомі зварних вузлів на основі локальних напружень;
- дослідити ресурс втомної довговічності металевих прогонових будов мостів на основі локальних змінних напружень;
- удосконалити інженерну методика розрахунку зварних вузлів мостів на витривалість;
- виконати порівняльні експерименти для обґрунтування запропонованої моделі розрахунку на витривалість.

**Об'єктом дослідження** є процес втомних руйнувань зварних вузлів мостових конструкцій при дії експлуатаційних навантажень.

**Предметом дослідження** є моделі визначення втомної довговічності зварних з'єднань конструкцій.

**Методи дослідження.** У процесі дослідження використано комплекс взаємодоповнюючих загальнонаукових та спеціальних методів: метод скінчених елементів реалізований у програмних комплексах ЛІРА, ANSYS; випробування конструкцій тензометричним методом; методи прогнозування втомної довговічності.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основний науковий результат дослідження полягає у розвитку теоретичних і практичних аспектів визначення ресурсу транспортних споруд. Наукова новизна полягає в наступному:

*вперше:*

– розроблено модель розрахунку зварних вузлів мостів на витривалість за локальними напруженнями, що включає в себе моделі експлуатаційних навантажень, визначення змінних напружень та характеристик опору втомі;

– запропонована нова модель призначення розрахункових характеристик опору втомі зварних вузлів конструкцій за локальними напруженнями і обґрунтовано ефективність її застосування на основі порівняння з іншими аналогами і натурними експериментами;

*удосконалено* інженерну методику розрахунку на витривалість зварних вузлів мостів, що дозволяє збільшити достовірність прогнозування їх втомного ресурсу;

*знайшли подальшого розвитку* дослідження скінчено-елементного моделювання локального НДС зварних вузлів конструкцій на основі використання системи «абсолютно жорстких тіл».

**Практичне значення наукових результатів** полягає у тому, що розроблена модель розрахунку на витривалість за локальними напруженнями дозволяє достовірніше визначати втомну довговічність мостових конструкцій з урахуванням багатоваріантного опрацювання різних схемно-конструктивних рішень зварних вузлів і дозволяє знизити витрати матеріалів у конструкції. Удосконалена інженерна методика розрахунку зварних вузлів мостів на витривалість дозволяє усунути невизначеності: відсутність в нормах проектування мостів відповідної групи елементів зварного вузла (категорії деталей); вплив складного НДС елементів вузлів.

Матеріали досліджень були впроваджені в ПАТ «Київсоюзшляхпроект» і ТОВ «Київбудпроект» при проектуванні і виконанні перевірочних розрахунків на витривалість прогонових будов мостів.

**Особистий внесок здобувача.** Результати наукових досліджень, що представлені у роботі, отримані автором самостійно та виносяться до захисту вперше. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, здобувачеві належить: [3, 4, 6 – 9] – аналіз основних факторів, що впливають на формування складного локального НДС в потенційно небезпечних зонах зварних вузлів мостів, [1, 2, 5] – розроблення методики побудови скінчено-елементної моделі для розрахунку локальних змінних напружень в зварних вузлах мостів, [5, 7, 10] – розроблення методики призначення розрахункових характеристик опору втомі зварних вузлів на основі локальних напружень, [3, 7, 9] – дослідження ресурсу втомної довговічності металевих прогонових будов мостів на основі локальних змінних напружень, [7, 9 10] – удосконалення інженерної методики розрахунку зварних вузлів мостів на витривалість і виконання порівняльних експериментів.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи і її основні положення доповідались й обговорювались на конференціях і семінарах: Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету (м. Київ, 2009,

2011, 2012, 2013 pp.); Международный конкурс научно-исследовательских студенческих работ с использованием программных комплексов ЛИРА (г. Киев, 2010, 2012 гг.); Міжнародна науково-практична конференція, сер. «Техніка, Технологія» (м. Київ, 2011 р.); Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології (м. Київ, 2011, 2013 pp.); 4 Міжнародна науково-практична конференція «Footbridge 2011» (Польща, м. Вроцлав, 2011 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (м. Дніпропетровськ, 2011, 2012, 2013 pp.); Международная конференция MIDAS по проектированию мостов (г. Москва, 2013 г.); Семінар по проектуванню мостів «Seminar and Workshop for BRIDGE ENGINEERING» (Індонезія, м. Джакарта, 2013 р.).

**Публікації.** За темою дисертації та результатами досліджень автором опубліковано 10 робіт, з них 5 в наукових фахових виданнях, 3 тези доповідей на наукових конференціях, 2 статті у зарубіжних виданнях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 218 сторінок, зокрема 172 сторінки основного тексту, 23 таблиці та 157 рисунків, список використаних джерел з 159 найменувань на 15 сторінках і 15 сторінок додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Здобувач висловлює щирю вдячність першому науковому керівнику чл.-кор. НАН України, доктору технічних наук Кир'яну Валерію Івановичу за його безцінний внесок у підготовку цієї дисертаційної роботи.

**У вступі** обґрунтовано актуальність, новизну та практичне значення дисертаційної роботи, зазначено необхідність розвитку моделі визначення втомної довговічності зварних вузлів мостових конструкцій.

**У першому розділі** аналізується світова тенденція виникнення і розвитку тріщин втоми в зварних вузлах мостів та розглядається сучасний стан проблеми прогнозування їх довговічності. Аналізуються основні фактори, які впливають на втому довговічність мостів.

Аналізом втомних пошкоджень в мостових конструкціях займались Большаков К.П., Шапіро Ю.Б., Труфяков В.І., Гершман А.С., Міролюбов Ю.П., Панін Є.М., Фролов В.В., Сподарева Ю.П., Осіпов В.О., Кир'ян В.І., Лінник Г.О., Корнієв М.М., Fisher J., Volchuk R., Miki Ch., F.V.P.de Jong. Дослідженнями НДС і основних причин виникнення тріщин втоми в автодорожніх і залізничних мостах займались Труфяков В.І., Дучинський Б.Н., Кондратов В.В., Дорошкевич А.А., Дворецький В.І., Подольський В.І., Путря Н.Н., Луговий П.З., Бобилев К.Б., Кир'ян В.І., Ковальчук В.С., Лінник Г.О., Шалінський В.В., Корнієв М.М., Бітаєв В.А., Fisher J., Volchuk R., Adams C.A., Connor R., Mertz D., Qian Z., Leendertz J.S.

Аналіз досліджень вказує на те, що тріщини втоми виникають як в дефектних, так і в якісних зварних з'єднаннях, які відповідають технічним умовам на виготовлення мостових конструкцій. Зародження тріщин втоми в дефектних

зварних з'єднаннях пов'язано з недотриманням належної якості при виготовленні металоконструкцій. В свою чергу зародження тріщин втоми в якісних зварних з'єднаннях вказує на неповне врахування особливостей роботи конструкцій на стадії проектування мостів, керуючись відповідною нормативно-технічною документацією.

Встановлено, що в загальноприйнятій інженерній практиці, розрахунок локального НДС в зварних вузлах металоконструкцій різного призначення, в рамках використання МСЕ, прийнято здійснювати із використанням двох підходів: розділення просторової конструкції на фрагменти для окремого дослідження їх НДС; застосування методу суперелементів. Але використання цих підходів для мостових конструкцій не є можливим, через наявність певних складнощів при моделюванні. Пов'язані вони із неточністю введення граничних умов, у вигляді вузлових зв'язків і зовнішніх навантажень на елементи, які отримуються при окремому розрахунку фрагментів конструкції. Метод суперелементів унеможливує використання багатоваріантного опрацювання різних типів конструктивних рішень зварних вузлів на стадії проектування, а також не при всіх видах НДС забезпечується точність визначення змінних локальних напружень в потенційно небезпечних місцях.

Проаналізовано сучасний стан розвитку методів розрахунку зварних конструкцій на витривалість на основі використання МСЕ. Значний внесок в галузі досліджень і розробок методів розрахунку зварних вузлів на витривалість за локальними напруженнями був внесений такими вченими як Вінокуров В.А., Пархоменко А.А., Дворецкий В.І., Бітаєв В.А., Василенко Д.А., Hobbacher A., Fricke W., Maddox S.I., Sonsino C.M., Radaj D., Yamada K., Xiao Z.G. Дослідження вчених показують, що «гарячою точкою» в зварних з'єднаннях (де зароджуються макротріщини), є лінія переходу від металу шва до основного металу, або корінь шва. Локальні напруження в «гарячій точці» залежать від різноманітності можливих геометричних і фізико-механічних особливостей зварних з'єднань. Теоретично, або практично, визначити фактичний напружений стан в «гарячій точці» зварного шва неможливо. Тому в розрахунок пропонується вводити відповідні припущення: введення фіктивних радіусів в концентраторах, або екстраполяція напружень в зону концентратора.

Існуючі методи розрахунку на витривалість за локальними напруженнями також мають певні складнощі, при використанні їх для розрахунку мостових конструкцій. Недоліком методу з введенням фіктивного радіуса є те, що він вимагає використовувати значно малий розмір скінчених елементів (СЕ) в зонах концентрації напружень (менш ніж 0,1 мм), що призводить до використання великої кількості СЕ і тривалого часу на розрахунок. Недоліком методу екстраполяції напружень у концентратор є потреба у процедурі обчислень множини точок на різних відстанях від лінії сплавляння зварного шва. Ці методи ускладнюють процедуру пошуку потенційно небезпечних зон в вузлах (зон утворення тріщин втоми) і потребують тривалого часу при багатоваріантному опрацюванні різних схемно-конструктивних рішень зварних вузлів на стадії проектування мостів. З практичної точки зору, при розрахунку зварних вузлів мостових конструкцій на

витривалість за локальними напруженням, більш ефективним є мінімізація припущень.

З огляду на вищенаведене сформульовані мета досліджень та задачі для її досягнення.

У **другому розділі** представлена методика побудови скінчено-елементної моделі для визначення змінних локальних напружень в зварних вузлах мостових конструкцій. Запропоновано використовувати єдину розрахункову модель, що складається із різнотипних СЕ: стержневих, оболонкових, тривимірних (рис. 1). Важливою умовою для такої моделі є те, що в тій області, де розташовується зварний вузол, слід проводити апроксимацію тривимірними СЕ, при цьому до вузлів тривимірних СЕ автоматично прикладаються відповідні граничні умови і навантаження. Граничні умови і навантаження формуються на основі деформування фрагмента конструкції із оболонкових СЕ, які в сукупності здатні відобразити складний НДС елементів. У свою чергу і до фрагменту із оболонкових СЕ автоматично прикладаються відповідні граничні умови і навантаження, в результаті деформування стержневих СЕ. Все це забезпечується за рахунок того, що в моделі виконується об'єднання різнотипних СЕ системою абсолютно жорстких тіл (АЖТ).

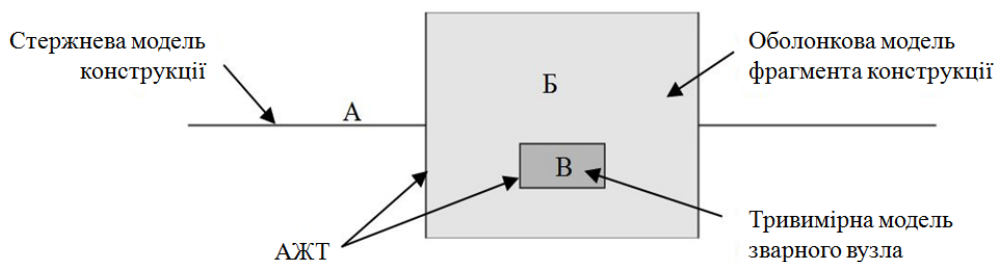


Рисунок 1 – Розрахункова модель конструкції з абсолютно жорсткими тілами для розрахунку локальних напружень у зварних вузлах

Особливістю роботи АЖТ є те, що воно складається із одного ведучого вузла і декількох відомих йому вузлів. При цьому переміщення  $u_s$  і кути повороту  $\theta_s$  кожного відомого вузла зв'язуються через радіус вектор  $\rho_{m-s}$  з переміщеннями  $u_m$  і кутами повороту  $\theta_m$  ведучого вузла залежністю (1). Оскільки у відповідних ділянках конструкції деформація її елементів підпорядковується гіпотезі плоских перерізів, раціональним є введення АЖТ у вигляді плоского перерізу при кожному переході від одного фрагмента моделі, апроксимованого одним типом СЕ, до іншого фрагмента моделі, з відмінним типом СЕ. Такий вид АЖТ в єдиній скінчено-елементній моделі (рис. 1) дозволяє визначати локальний НДС в зварних вузлах конструкцій будь-якої складності, адекватно передаючи спадковий НДС від одного фрагмента конструкції до іншого. Для підтвердження цього були проведені числові дослідження, які дозволили встановити оптимальні розміри фрагментів із оболонкових СЕ, розміри моделей зварних вузлів із тривимірних СЕ, а також правила об'єднання фрагментів за допомогою системи АЖТ.



$$\begin{pmatrix} u_s \\ \theta_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_m + \theta_m \times \rho_{m-s} \\ \theta_m \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Дослідження показали, що модель з АЖТ значно спрощує аналіз дійсної роботи зварних вузлів конструкцій з урахуванням складного локального НДС конструктивних елементів при різних схемах експлуатаційного навантаження. Це дозволяє визначати локальні змінні напруження в потенційно небезпечних зонах зварних вузлів при їх різних конструктивних формах.

У третьому розділі представлено розроблення моделі призначення розрахункових ХОВ зварних вузлів за локальними напруженнями. Для цього були проведенні числові дослідження закономірностей розподілу локальних напружень в різних типах зварних з'єднань, відповідно до нормативно-технічної документації на виготовлення мостових конструкцій. Дослідження проводилися на найпоширеніших типах зварних з'єднань мостів, в процесі експлуатації яких з'являються тріщини втоми: таврові, хрестоподібні і з приваркою поздовжніх ребер. Для кожного типу з'єднань за МСЕ проводився детальний аналіз впливу геометрії зварного шва, в межах допустимої варіації, на характер розподілу і величину локальних напружень в потенційно небезпечній зоні з'єднання при дії простого і складного НДС. Розглядалися зварні з'єднання з товщиною основних елементів в діапазоні від 8 до 24 мм. Розміри катетів кутового шва розглядалися мінімальні і гранично допустимі, при характерній товщині елементів. Розрахункові моделі досліджуваних з'єднань створювалися з відповідною точністю апроксимації скінченими елементами.

Результати досліджень дозволили встановити відстань від лінії сплавлення зварного шва, яка задовольняє умовам, при яких геометричні та фізико-механічні особливості зварного шва перестають позначатися на величину локальних напружень, при цьому локальні напруження забезпечують достатню точність у визначенні витривалості зварного вузла при будь-якому НДС елементів. Встановлено, що на віддаленні від лінії сплавлення зварного шва більше  $0,17t$  ( $t$  – товщина основного металу), різні геометричні форми шва практично не впливають на величину локальних напружень (рис. 2). В результаті були встановлені значення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень  $\alpha_{0,17t}$ , які необхідні для переведення кривих втоми зварних з'єднань із номінальних напружень в локальні напруження.

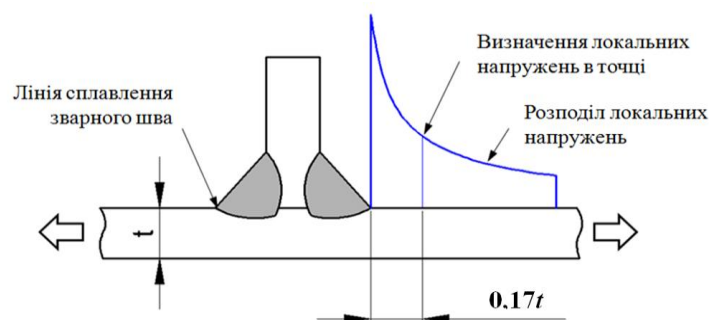


Рисунок 2 – Схема визначення локальних напружень в зоні зварного з'єднання

Переведення кривих втоми виконується шляхом множення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень  $\alpha_{0,17t}$  на обмежений розмах номінальних напружень  $\Delta\sigma_D$ , при заданому числі циклів навантаження  $N_D$ . Значення  $\Delta\sigma_D$  для різних типів зварних з'єднань можуть використовуватися за даними діючих норм проектування мостів. Рівняння розрахункової кривої втоми, вираженої в локальних напруженнях  $\sigma_{0,17t}$ , може бути представлено у вигляді:

$$N_i = N_D \cdot \left( \frac{\alpha_{0,17t} \Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_{0,17t_i}} \right)^m, \quad (2)$$

де  $N_i$  – число циклів до виникнення тріщини втоми у зварному з'єднанні при діючому розмаху локальних змінних напружень  $\Delta\sigma_{0,17t_i}$ ;

$m$  – кут нахилу кривої втоми в логарифмічній шкалі.

При переведенні нормативної кривої втоми із номінальних напружень в локальні, вона лише еквідестантно зміститься вгору (рис. 3), так як кути нахилів кривої в логарифмічній шкалі залишаються незмінними.

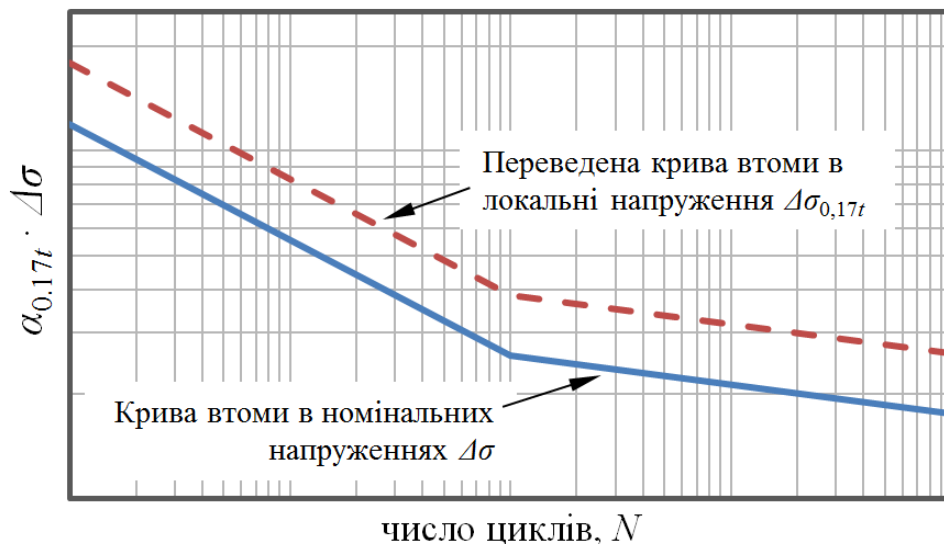


Рисунок 3 – Переведення кривої втоми із номінальних напружень в локальні  $\sigma_{0,17t}$

У розрахунках на витривалість локальні змінні напруження  $\sigma_{0,17t}$  враховують концентрацію напружень, викликану різними формами зварних вузлів мостів, а криві втоми враховують невизначеності, що пов'язані із фактичною формою зварного шва, рівнем залишкових напружень, фізико-механічною неоднорідністю матеріалів.

В умовах дії складного змінного НДС елементів, в якому при кожному циклі навантаження одночасно проявляється комбінація нормальних і дотичних напружень, в розрахунку слід оперувати потоками головних локальних напружень:

$$\sigma_{0,17t,1,2} = \frac{\sigma_{0,17t,x} + \sigma_{0,17t,y}}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_{0,17t,x} - \sigma_{0,17t,y})^2 + 4 \cdot \tau_{0,17t,xy}^2} . \quad (3)$$

У випадку, коли траєкторія дії головних напружень відхиляється від осі, перпендикулярної до лінії сплавлення шва, в зоні утворення тріщини, на кут  $\varphi = \pm 60^\circ$  (рис. 4), крива втоми може прийматися як для з'єднання при дії зусиль під кутом  $\varphi = 0^\circ$ .

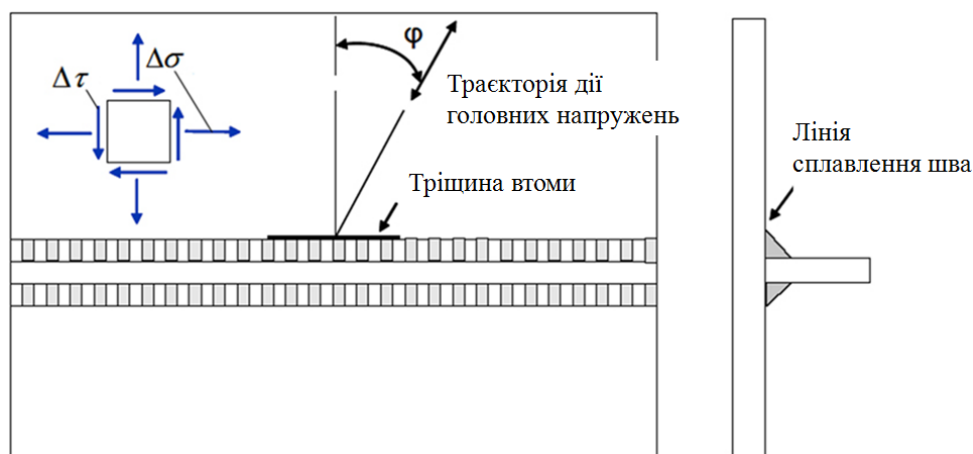


Рисунок 4 – Траєкторія дії головних напружень під кутом  $\varphi = \pm 60^\circ$  від осі, перпендикулярної до лінії сплавлення шва ( $\Delta\sigma$  – розмах нормальних напружень,  $\Delta\tau$  – розмах дотичних напружень)

Для оцінки придатності розробленої моделі призначення ХОВ за локальними напруженнями  $\sigma_{0,17t}$  проводився порівняльний аналіз розрахункової довговічності із даними натурних випробувань. Також, результати розрахунку за розробленим методом зіставлялися із результатами розрахунку по існуючим методам: метод напружень в «ефективному концентраторі», метод екстраполяції напружень в «гарячу точку». В рамках зіставлення з експериментом приймалися результати втомних випробувань в лабораторних умовах зварних зразків-фрагментів мостів із різними конструктивними формами при дії простого і складного НДС. Експериментальні зразки відтворювали зварні вузли, які базувалися на таврових, хрестоподібних і з приваркою поздовжніх і поперечних ребер зварних з'єднаннях з високим рівнем залишкових напружень. Загальна кількість лабораторних зразків для зіставлення складала 75.

На рис. 5 – 8 приведені деякі із результатів зіставлення розрахункових даних довговічності за методом локальних напружень  $\sigma_{0,17t}$  з іншими методами і результатами натурних випробувань. Результати зіставлення показали, що всі методи розрахунку ХОВ за локальними напруженнями дають практично однакові розрахункові значення довговічності і попереджують про зародження тріщини втоми у зварних з'єднаннях у прийнятні терміни. У середньому, розбіжність між розрахунковими значеннями довговічності не перевищує 5%. Встановлено, що для розрахунку витривалості зварних вузлів за локальними напруженнями, немає

потреби у введенні певних припущень, які пропонуються згідно з рекомендаціями інших методів, у вигляді введення фіктивного радіуса або екстраполяції напружень. Стосовно до зварних вузлів мостових конструкцій, метод локальних напружень  $\sigma_{0,17t}$  дозволяє визначати втомну довговічність з достатньою точністю і з більш зручною практичною реалізацією.

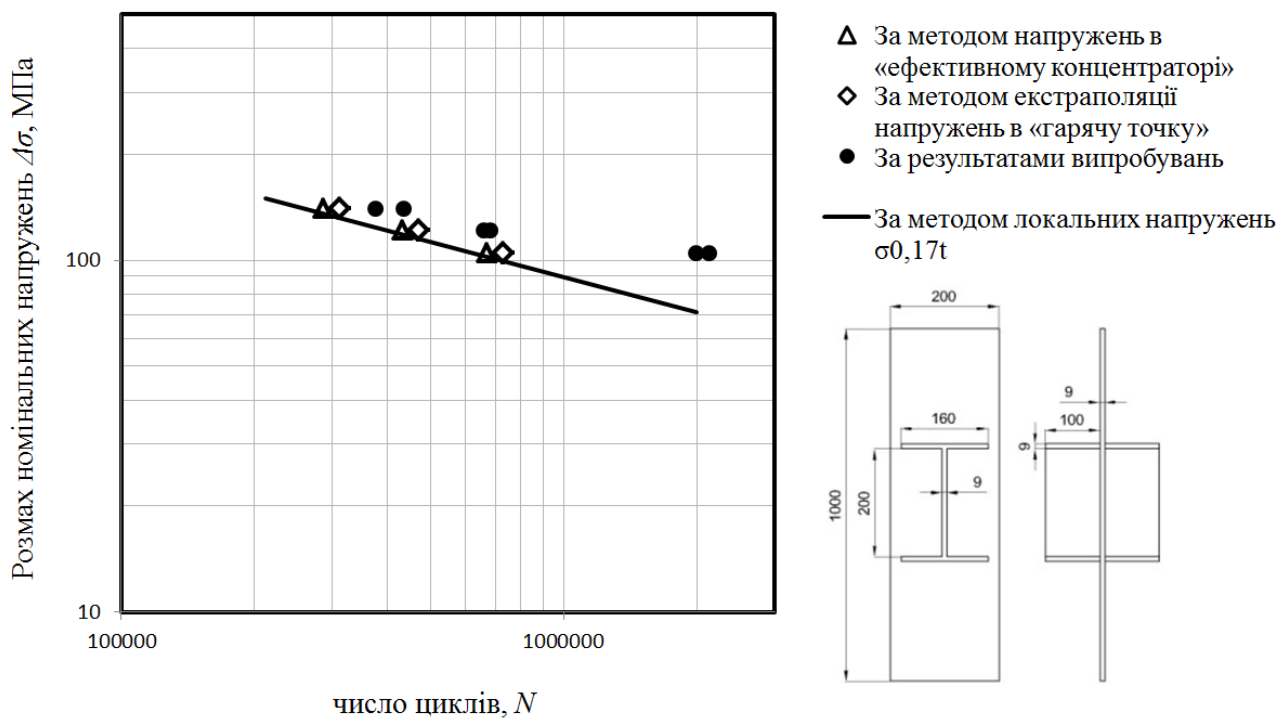


Рисунок 5 – Результати втомної довговічності зварного зразка з приваркою до пластини двотаврових елементів

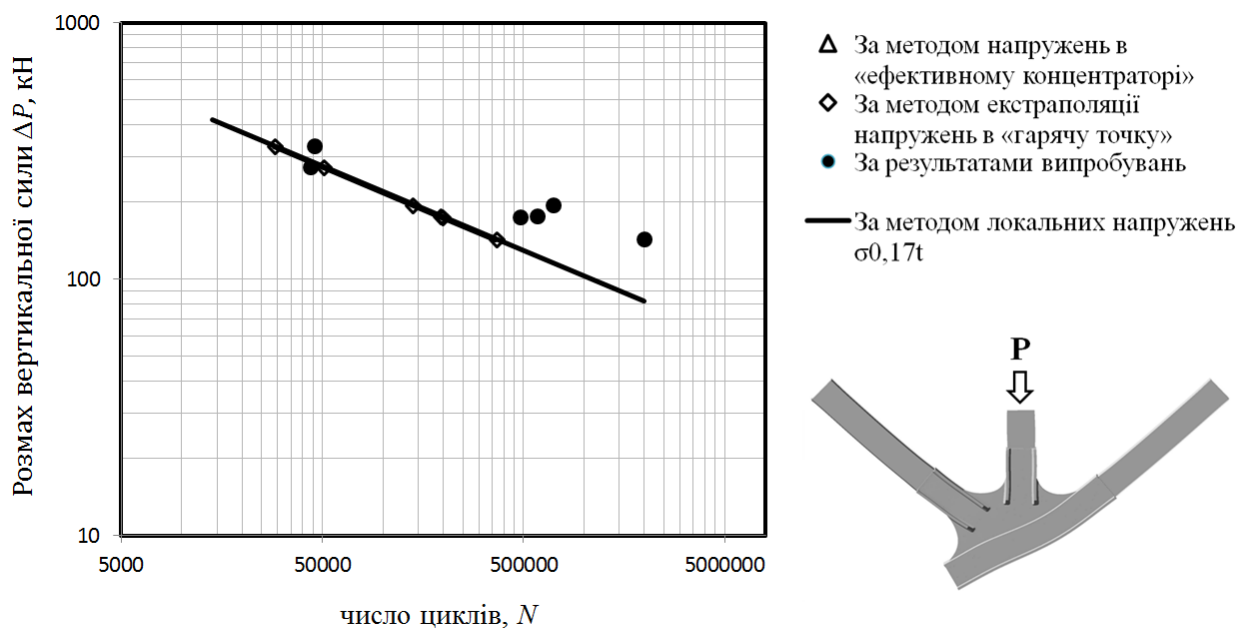


Рисунок 6 – Результати втомної довговічності зварного зразка, що відтворює вузол сполучення несучих елементів головної ферми

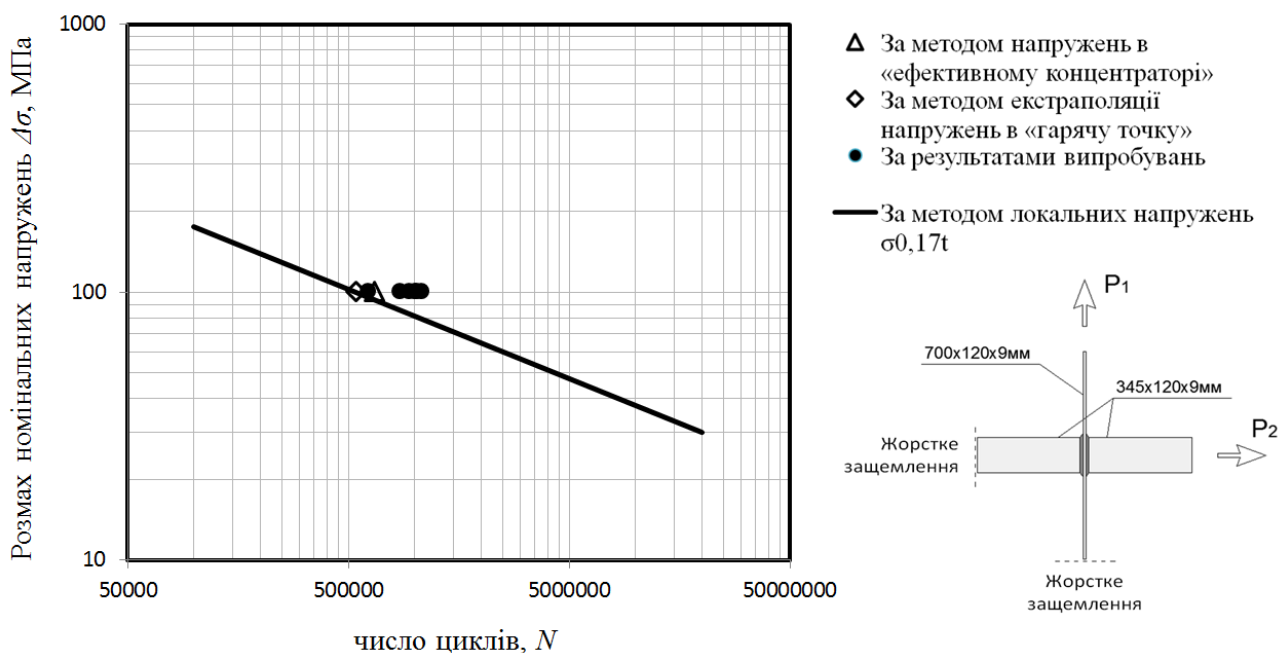


Рисунок 7 – Результати втомної довговічності зварного зразка з приваркою поздовжніх ребер при  $\Delta P_2 / \Delta P_1 = 0,5$

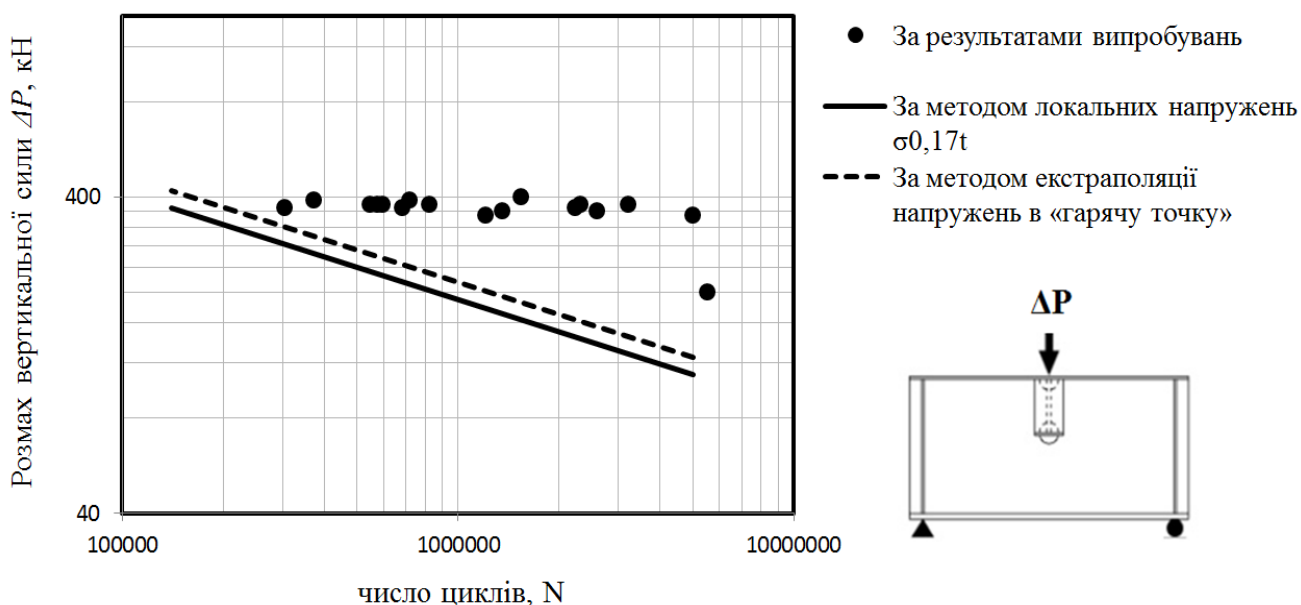


Рисунок 8 – Результати втомної довговічності зварного зразка, що відтворює вузол ортотропної плити

У четвертому розділі представлено дослідження втомної довговічності зварних вузлів прогонових будов мостів за локальними напруженнями при дії експлуатаційного транспорту на основі розробленої методики. Дослідження враховувало визначення впливу складного НДС елементів прогонових будов залізничних мостів на розподіл локальних напружень в потенційно небезпечних зонах. Локальні напруження визначались на відстані  $0,17t$  від лінії сплавлення зварного шва і в подальшому враховувались при визначенні ресурсу конструкції до

виникнення тріщин втоми. Розрахунковий ресурс порівнювався із даними експлуатації натурних конструкцій. В рамках дослідження розглядались зварні вузли прикріплення поперечних ребер жорсткості до стінок балок типових прогонових будов залізничних мостів за ТП №690 і ТП №821.

За результатами числових досліджень встановлено, що локальний НДС зварних вузлів, при проходженні залізничного транспорту, суттєво залежить від місцевого положення коліс вагонів. Положення колеса візка поблизу поперечного ребра балки призводить до місцевого вигину стінки і виникненню складного локального НДС поблизу зварного шва (рис. 9а). Даний вигин виникає від місцевого крутіння верхнього поясу балки, що в свою чергу пов'язано із поперечним згином мостового бруса. На рис. 9б представлені максимальні місцеві поперечні деформації стінки балки при проходженні залізничного транспорту.

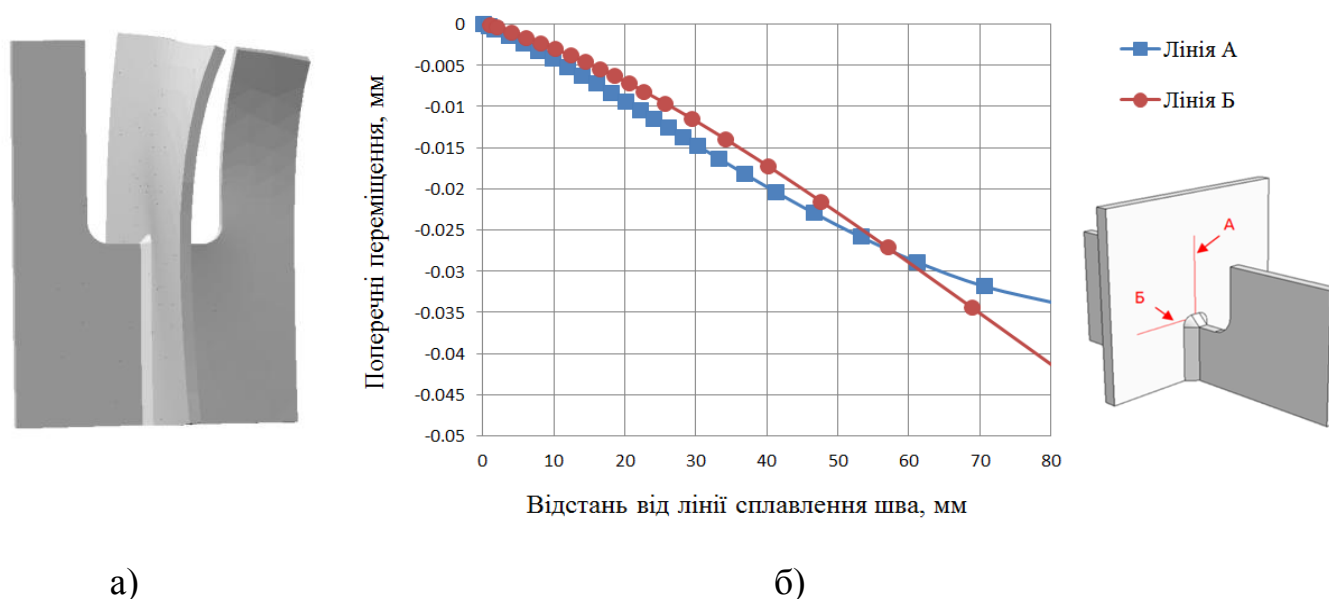


Рисунок 9 – Локальна просторова деформація стінки балки між вирізами в поперечних ребрах (ТП №690): а – загальний вид деформації; б – місцеві поперечні переміщення стінки

На рис. 10 наведено характер розподілу поперечних напружень на зовнішній і внутрішній стороні стінки балки (ТП №690) у вирізах в поперечних ребрах, які викликані максимальним місцевим вигином стінки із площини. Характер розподілу напружень по висоті стінки суттєво відрізняється. Із зовнішньої сторони стінки, поблизу до лінії сплавлення зварного шва, виникають стискаючі напруження, а при віддалені від зварного шва виникають напруження розтягу. З внутрішньої сторони стінки поперечні напруження так само мають різні знаки по висоті, при цьому поблизу до лінії сплавлення шва виникають напруження розтягу, які приблизно в два рази перевищують напруження із зовнішньої сторони стінки за модулем. Виявлена суттєва розбіжність і в закономірностях розподілу поздовжніх напружень в зоні зварного шва (рис. 11). На зовнішній стороні стінки виникають максимальні стискаючі напруження, які на віддалені від зварного шва поступово знижуються. На

внутрішній стороні стінки, біля лінії сплавлення шва, виникають незначні розтягувальні напруження і з віддаленням від зварного шва проявляються стискаючі напруження.

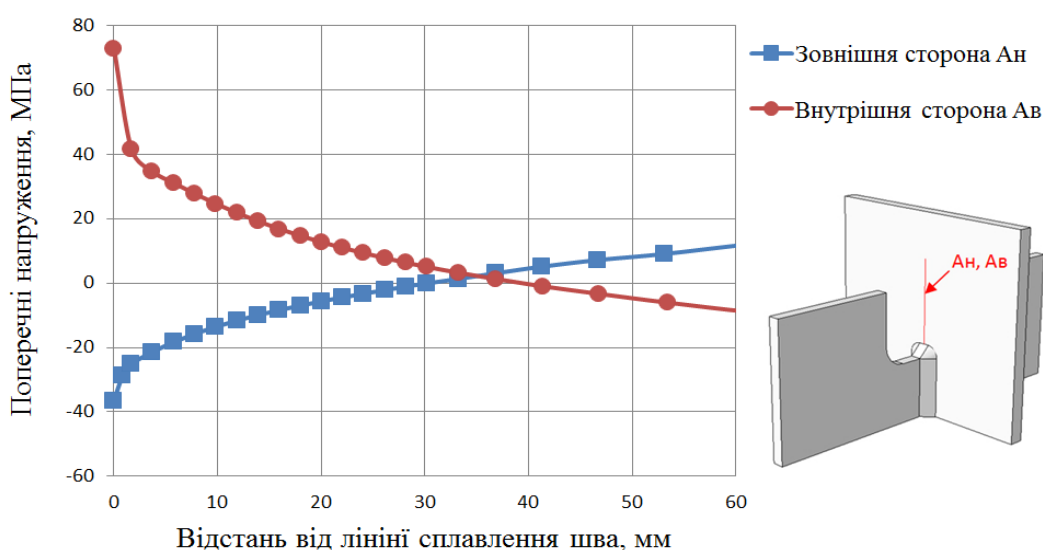


Рисунок 10 – Поперечні напруження в стінці балки у вирізах в поперечних ребрах жорсткості (ТП №690)

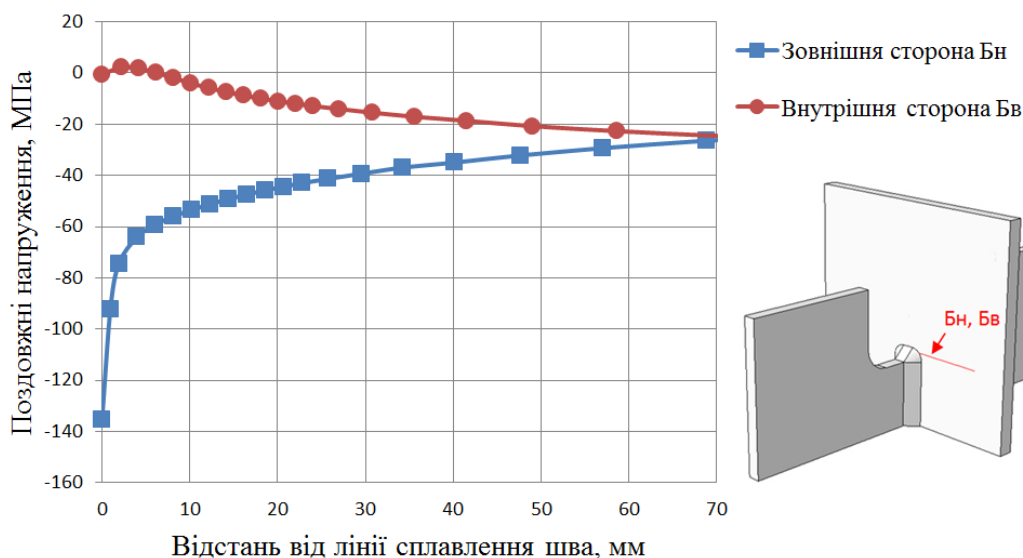


Рисунок 11 – Поздовжні напруження у стінці балки у вирізах в поперечних ребрах жорсткості (ТП №690)

За результатами аналізу локальних напружень  $\sigma_{0,17t}$  в зварних вузлах типових прогонових будов, були виявлені потенційно небезпечні місця утворення тріщин втоми. Перша точка знаходиться на зовнішній стороні балки, в зоні дії максимальних поздовжніх стискаючих напружень. Друга точка знаходиться на внутрішній стороні стінки балки, в зоні дії максимальних розтягувальних поперечних напружень.



Результати розрахунку довговічності прогонової будови за ТП №690 у встановлених точках показали, що до можливого зародженню тріщин втоми призводять саме стискаючі напруження. На рис. 12 приведена крива втоми, що виражена в локальних напруженнях  $\sigma_{0,17t}$  для зварного з'єднання з приваркою поперечних ребер, повним проплавленням зварного шва і високим рівнем залишкових напружень ( $\alpha_{0,17t} \cdot \Delta\sigma_D = 88$  МПа при  $2 \cdot 10^6$  циклів навантаження). На кривій втоми наведений розмах діючих головних стискаючих напружень, який за модулем складає  $\Delta\sigma_{0,17t} = 82,6$  МПа. При даному рівні змінних напружень число циклів до утворення тріщини втоми становить приблизно  $2,4 \cdot 10^6$ . З урахуванням того, що максимальний розмах напружень у вузлі виникає при проходженні кожної пари суміжних візків вагонів, і проходженні по прогоновій будові 100 еталонних поїздів за добу, кожен 365 днів у році, поява тріщини втоми очікується приблизно через 2 роки експлуатації. При порівнянні отриманих даних в результаті розрахунку із даними експлуатації прогонових будов за ТП №690, де тріщини втоми в досліджуваному вузлі можуть з'являтися через 4 роки після початку експлуатації, представлена оцінка ресурсу конструкції за локальними напруженнями попереджує про зародження тріщини втоми в прийнятні терміни, та обґрунтовує недоліки прийнятого конструктивного рішення зварного вузла. При цьому, розрахунок прогонової будови на основі діючих норм проектування мостів вказує на безвідмовну роботу конструкції за весь проектний період її експлуатації.

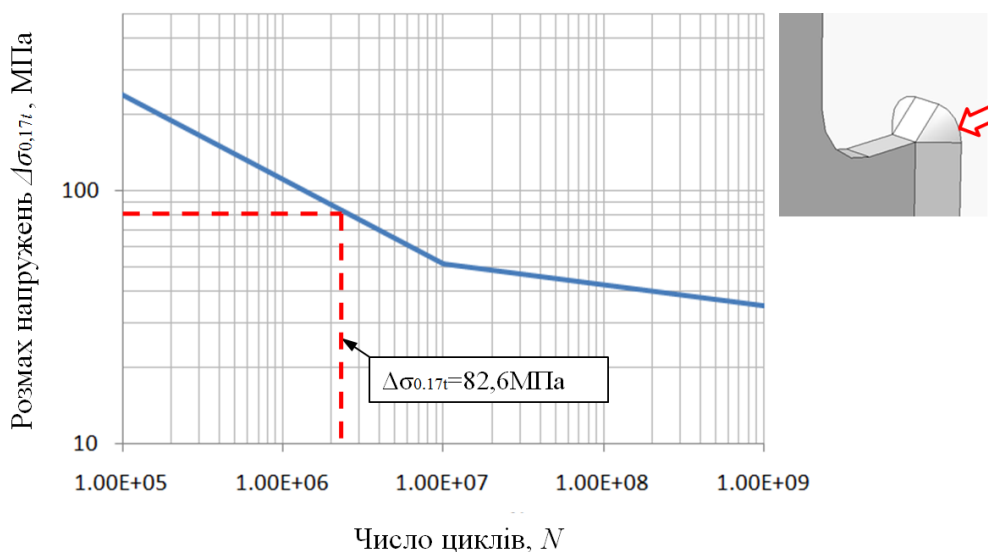


Рисунок 12 – Крива втоми для потенційно небезпечної зони зварного вузла прикріплення поперечних ребер жорсткості (ТП №690), що виражена в локальних напруженнях  $\sigma_{0,17t}$

За результатами досліджень зварного вузла прикріплення поперечних ребер жорсткості до стінки суцільностінчатої балочної прогонової будови за ТП №821 було встановлено, що в процесі експлуатації виникає двочастотний режим навантаження. Він характеризується тим, що один цикл навантаження елементів зварного вузла, який відповідає загальній деформації прогонової будови при



проходженні поїзда, має одну частоту і один вид НДС, а другий цикл навантаження, який залежить від місцевого положення коліс вагонів біля вузла, має іншу частоту і інший вид НДС. Дослідження впливу двочастотного навантаження на довговічність зварного вузла базувались на дослідженнях, проведених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ. Довговічність зварних з'єднань при двочастотному навантаженні  $N_{II}$  визначається на основі кривих втоми для одночастотного навантаження  $N_I$ , використовуючи співвідношення:

$$N_{II} = \frac{N_I}{\chi}, \quad (4)$$

де понижуючий коефіцієнт  $\chi$  залежить від співвідношення амплітуд напружень  $\sigma_2 / \sigma_1$  і співвідношення частот  $f_2 / f_1$ :

$$\chi = \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^{v \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}, \quad (5)$$

де  $f_2$  – висока частота;

$f_1$  – низька частота;

$\sigma_2$  – амплітуда напружень з високою частотою;

$\sigma_1$  – амплітуда напружень з низькою частотою;

$v$  – коефіцієнт, який залежить від матеріалу.

За результатами досліджень було встановлено зниження довговічності зварного вузла прогонової будови (ТП №821) при двочастотному навантаженні приблизно в 4 рази, що призводить до виникнення тріщини втоми через 12 років при дії еталонного залізничного транспорту. Дані експлуатації прогонових будов за ТП №821 вказують на появу тріщин втоми через 7 років після початку експлуатації. Тобто, розрахунок за локальними напруженнями дозволяє наблизитись до фактичного ресурсу мостової конструкції.

У п'ятому розділі представлено розвиток інженерного методу розрахунку на витривалість зварних вузлів мостів, як залізничних, так і автодорожніх, а також наводиться приклад використання методу на практиці. Розрахунок пропонується виконувати з урахуванням розгляду двох типів змінних напружень в елементах вузлів: номінальних і локальних. Номінальні напруження розглядаються у випадку коли у вузлі виникає лише простий вид НДС елементів (осьовий розтяг-стиск, згин в площині). Локальні напруження в зоні зварного з'єднання розглядаються у тому випадку, коли в елементах виникають місцеві просторові силові фактори, що призводять до складного локальному НДС (місцевий вигин із площини, стиснуте крутіння, тощо). Розроблені відповідні алгоритми послідовності розрахунку витривалості зварних вузлів залізничних і автодорожніх мостів.

Стосовно до зварних вузлів залізничних мостових конструкцій, перевірку на витривалість за локальними напруженнями пропонується виконувати на основі виразу:

$$\Delta\sigma_{i,0,17t} \leq \frac{\xi \cdot \alpha_{0,17t} \Delta\sigma_D \cdot m_r}{\gamma_r \cdot \chi}, \quad (6)$$

де  $m_r$  – коефіцієнт умов роботи;

$\gamma_r$  – коефіцієнт надійності;

$\xi$  – коефіцієнт режиму навантаження.

В залізничних мостах змінні напруження в елементах пропонується визначати при дії нормативного залізничного транспорту СК не у вигляді еквівалентного рівномірно розподіленого навантаження, а у вигляді окремого потяга, що складається із 8-вісного локомотива з осьовим тиском 330 кН і 30 6 і 8-вісних вантажних вагонів з осьовим тиском 300 кН. Врахування такої схеми навантаження пов'язано з необхідністю визначення локального НДС елементів вузлів від місцевого проходження коліс потяга.

Розрахунок зварних вузлів автодорожніх мостових конструкцій, в умовах виникнення складного локального НДС, слід також визначати згідно залежності (6), але без врахування коефіцієнтів  $\chi$  і  $\xi$ . В якості схеми навантаження рекомендується використовувати нормативну схему візка АК з урахуванням положення колеса згідно нормативних статистичних даних руху транспортних засобів.

У випадку розрахунку за локальними напруженнями при нестационарному режимі навантаження, рекомендується використовувати класичну гіпотезу лінійного накопичення втомних пошкоджень:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \leq D, \quad (7)$$

де  $n_1, n_2, n_3 \dots n_i$  – число циклів, які відповідають розмахам діючих змінних локальних напружень  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3 \dots \Delta\sigma_i$  на відстані  $0,17t$  від лінії сплавлення зварного шва в досліджуваній зоні вузла;

$N_1, N_2, N_3 \dots N_i$  – число циклів до утворення тріщини втоми при діючому розмаху змінних напружень  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3 \dots \Delta\sigma_i$  в елементі;

$D$  – гранична величина відносних пошкоджень.

Практичне використання запропонованого методу розрахунку на витривалість представлено на прикладі дослідження ресурсу прогонової будови, що експлуатується на залізничній ділянці Київ-Московський – Дарниця мостового переходу через р. Дніпро у м. Києві.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, що полягає в удосконаленні моделі розрахунку зварних вузлів мостів на витривалість.

Здійснені у дисертаційній роботі дослідження дають змогу зробити такі висновки:

1. Виконано аналіз сучасного стану проблеми втомної довговічності зварних вузлів металевих мостів. Виявлені основні місця втомних пошкоджень в мостах.

2. Встановлено, що застосування розробленої скінчено-елементної моделі, яка складається із різнотипних СЕ об'єднаних системою АЖТ, дозволяє визначати закономірності виникнення та зміни складного локального НДС зварних вузлів мостових конструкцій.

Встановлені оптимальні розміри фрагментів із оболонкових СЕ і моделей зварних вузлів із тривимірних СЕ. Для балочної прогонової будови достатньо вводити фрагмент із оболонкових СЕ, який включає в себе лише чотири відсіки стінки. Для зварного вузла достатньо створювати тривимірну модель, в якій відстань від лінії сплавлення шва до границі моделі не менше  $2t$ , де  $t$  – товщина основного металу.

3. Встановлено закономірності розподілу локальних напружень в різних типах зварних з'єднань, залежно від різних формоутворень зварних швів, згідно із технічними умовами на виготовлення мостових конструкцій. Виявлено, що найбільший вплив на локальний характер розподілу напружень мають такі фактори: перевищення посилення шва, зазор в зоні несплавлення, радіус закруглення в зоні переходу від металу шва до основного металу, подрізи. Також виявлено, що найменший вплив надають: напливи до крайок шва, різний кут сполучення поверхні шва, перевищення катета шва і його асиметрія.

4. Вперше встановлено, що на віддаленні від лінії сплавлення шва на величину  $0,17t$  різні формоутворення зварного шва практично не впливають на величину локальних напружень. Отримані теоретичні коефіцієнти концентрації напружень  $\alpha_{0,17t}$  для переведення кривих втоми зварних з'єднань із номінальних напружень в локальні  $\sigma_{0,17t}$ .

5. Підтверджена адекватність розробленої моделі призначення ХОВ за локальними напруженнями  $\sigma_{0,17t}$ . У порівнянні з натурними випробуваннями зварних зразків на витривалість, розрахунок за локальними напруженнями  $\sigma_{0,17t}$  попереджує про зародження тріщини втоми у прийнятні терміни. У зіставленні із альтернативними методами розрахунку, розбіжність між розрахунковими значеннями довговічності у середньому не перевищує 5 %.

6. За результатами досліджень локального НДС елементів типових залізничних прогонових будов (ТП №821 і ТП №690) встановлено, що при дії експлуатаційного навантаження, в одному і тому ж зварному вузлі прикріплення ребер жорсткості, можуть виникати декілька потенційно небезпечних зон утворення тріщин втоми. Закономірність зміни локального НДС вузлів суттєво залежить від схеми місцевого положення коліс потягу.

7. Результати досліджень втомної довговічності вузлів прогонових будов за локальними напруженнями при дії еталонного потягу встановили ресурс прогонових будов 2 роки для ТП №690 і 12 років для ТП №821. У порівнянні з даними експлуатації натурних конструкцій мостів встановлено, що розрахунок

витривалості за локальними напруженнями дозволяє наблизитись до їх фактичного ресурсу.

8. Удосконалено інженерну методику розрахунку зварних вузлів мостів на витривалість. Запропоновано відповідні залежності для виконання перевірок, моделі рухомого навантаження, а також розроблені алгоритми послідовності розрахунку автодорожніх і залізничних мостів.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті у виданнях іноземних держав:**

1. Malgin M. Analysis of the footbridge of the Boryspil airport traffic interchange / M. Malgin, K. Medvediev // *Attractive structures at reasonable costs.* – Poland, 2011. – P.904-910.

2. Мальгин М.Г. Верификация методики компьютерного моделирования взаимодействия железнодорожных экипажей и мостов / М.Г. Мальгин, Г.В. Михеев, Е.А. Кругова, В.И. Кирьян // *Вестник ВНИИЖТ.* – Москва, 2011. – №5. – С.29-33.

### **Статті у наукових фахових виданнях:**

3. Мальгин М.Г. Оценка влияния отклонений от проектных решений в конструкции ортотропной плиты металлического пролетного строения на НДС и усталостную долговечность / М.Г. Мальгин, Л.Н. Беспалов // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво.* – К: НТУ, 2009. – Вип. 77. – С.9-15.

4. Мальгин М.Г. Пути обеспечения нормативного ресурса пролетных строений мостов / М.Г. Мальгин, В.И. Кирьян // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.* – Дніпропетровськ, 2011. – № 39. – С.55-59.

5. Мальгин. М.Г. Расчет локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций / М.Г. Мальгин, В.И. Кирьян, В.И. Дворецкий // *Автоматическая сварка.* – Киев, 2012. – №4. – С.3-7.

6. Мальгин М.Г. Расчет на усталость сварных узлов ортотропных плит металлических пролетных строений мостов по локальным напряжениям / М.Г. Мальгин, В.И. Кирьян // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.* – Дніпропетровськ, 2011. – № 39. – С. 91-97.

7. Мальгин М.Г. Модель расчета мостовых конструкций на усталость по локальным напряжениям / М.Г. Мальгин, К.В. Медведев // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* – Дніпропетровськ, 2014. – №6. – С.89-102.

### **Опубліковані праці апробаційного характеру:**

8. Мальгин М.Г. Анализ переменных напряжений в сварных узлах пролетных строений системы "Мост-поезд" / М.Г. Мальгин, В.И. Дворецкий, Г.В. Михеев, Е.А. Кругова // *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта:*

Тезисы 73 Международной научно-практической конференции. – Д.: ДИИТ, 2013. – С. 120-123.

9. Мальгин М.Г. Анализ НДС и усталостной долговечности конструкции ортотропной плиты с учетом отклонений от проектных решений // Тези доп. VI науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології». – Київ, 2011р. – С.74.

10. Мальгин М.Г. Расчет усталостной долговечности сварных пролетных строений мостов на основе локальных напряжений / М.Г. Мальгин, В.И. Дворецкий // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 73 Международной научно-практической конференции. – Д.: ДИИТ, 2013. – С.183.

### АНОТАЦІЯ

Мальгін М.Г. Моделювання витривалості зварних вузлів мостів за локальними напруженнями. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Національний транспортний університет, Київ 2015.

Дисертаційна робота присвячена розробці моделі розрахунку зварних вузлів мостових конструкцій на витривалість за локальними напруженнями.

Вирішено актуальну задачу розрахунку витривалості вузлів конструкцій в умовах складного локального НДС елементів при різних схемах змінного навантаження.

Розроблено методіку побудови скінчено-елементної моделі мостової конструкції для розрахунку локальних змінних напружень в зварних вузлах, в умовах дії експлуатаційних навантажень.

Розроблено модель призначення розрахункових характеристик опору втомі зварних вузлів мостових конструкцій за локальними напруженнями.

Досліджено втомну довговічність типових прогонових будов залізничних мостів за локальними напруженнями, при експлуатації яких виникають тріщини втоми. Удосконалено інженерну методіку розрахунку залізничних і автодорожніх мостів на витривалість. Виконано порівняльний аналіз розрахункової довговічності зварних вузлів із даними лабораторних випробувань та даними експлуатації натурних конструкцій.

**Ключові слова:** витривалість, зварний вузол, мостова конструкція, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан.

### АННОТАЦИЯ

Мальгин М.Г. Моделирование выносливости сварных узлов мостовых конструкций по локальным напряжениям. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Национальный транспортный университет, Киев 2015.

Диссертационная работа посвящена разработке модели расчета сварных узлов мостовых конструкций на выносливость по локальным напряжениям.

Решена актуальная задача расчета выносливости узлов конструкций в условиях сложного локального НДС элементов при различных схемах переменного нагружения.

Разработана методика построения конечно-элементной модели мостовой конструкции для расчета локальных переменных напряжений в сварных узлах, в условиях действия эксплуатационных нагружений.

Разработана модель назначения расчетных характеристик сопротивления усталости сварных узлов мостовых конструкций по локальным напряжениям.

Исследована усталостная долговечность типовых пролетных строений железнодорожных мостов по локальным напряжениям, в процессе эксплуатации которых зарождаются трещины усталости. Усовершенствовано инженерную методику расчета железнодорожных и автодорожных мостов на выносливость. Выполнен сравнительный анализ расчетной долговечности сварных узлов с данными лабораторных испытаний и эксплуатации натуральных конструкций.

**Ключевые слова:** выносливость, сварной узел, мостовая конструкция, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

#### ANNOTATION

Malgin M. Fatigue life assessment of welded bridge joints using local stress approach. – Manuscript.

The dissertation for obtaining the degree of candidate of technical science, specialty 05.23.17 – Building mechanics. – National Transport University, Kyiv 2015.

The thesis work is devoted to the modeling of bridge welded joints endurance based on local stresses.

The actual problem of assessment of welded joints fatigue in case of complex local stress-deformed states of structural elements with different schemes of live load was solved.

The procedure of bridge finite-elements model creation for analysis of local stresses in welded joints was developed.

The procedure of appointment of the design characteristics of fatigue resistance for bridge welded joints based on local stresses was developed.

The fatigue life of the regular bridge girders, that covered by fatigue damages during the exploitation, was investigated. Engineering method for fatigue design check of railway and road bridges was developed. The comparison of calculated fatigue life of welded joints with experimental test data and data of exploitation of full-scale structure was made.

**Keywords:** fatigue life, welded joint, bridge structure, finite element method, the stress-strain state.