

**СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ З'ЄДНАННЯ ПОЛИЧКИ ТА СТІНКИ СТАЛЕВИХ ПІДКРАНОВИХ БАЛОК**

**CURRENT STATE OF RESEARCH ON FATIGUE STRENGTH OF THE WEB-FLANGE CONNECTION OF STEEL RUNWAY BEAMS**

**Самчук Р. А., аспірант** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів), **Хміль Р. Є., д.т.н., професор** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

**Roman Samchuk, Ph.D student**, <https://orcid.org/0009-0005-7673-7708> (Lviv Polytechnic National University, Lviv), **Khmil R. Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor**, <https://orcid.org/0000-0001-7578-8750> (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

У статті досліджено сучасний стан втомної міцності з'єднання полицки та стінки сталевих підкранових балок. Розглянуто основні чинники впливу, включаючи складний НДС, класи надрізу та різні конфігурації балок. Надано рекомендації для подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення існуючих методик розрахунку та визначення ефективності використання підкранових балок у вигляді різних конфігурацій.

This study investigates the current state of research on the fatigue strength of the web-flange connection in steel runway beams used in overhead cranes. The aim is to analyze the main factors affecting the fatigue strength of this connection, including the complex stress-strain behavior resulting from actual operational conditions, notch classification, and different web-flange configurations, such as welded, rolled, and combined connections. The research highlights the importance of accurately assessing the fatigue life of both new and existing structures, particularly those designed decades ago using simplified standards. The primary focus is on analyzing the results of previous studies. Key findings emphasize the influence of different notch classifications and the complex stress-strain behavior in this area, primarily due to the combined effects of bending, tensile, and compressive stresses, on the fatigue performance of crane runway beams. The study contributes to enhancing existing calculation methods and provides recommendations for future investigations aimed at improving fatigue verification methods and determining the effectiveness of using crane runway beams in different configurations to achieve the required fatigue life. Finally, practical

**implications suggest potential improvements in fatigue life prediction through detailed evaluation of different connection configurations and localized stress analysis.**

**Ключові слова:** втома, міцність, підкранові балки, з'єднання, полицка, стінка, клас надрізу, НДС, надійність, тріщина.

Fatigue, strength, runway beams, connection, flange, web, notch class, stress-strain state, reliability, crack.

**Вступ.** Мостові крани та їхні опорні конструкції, зокрема сталеві підкранові балки, є критично важливими елементами в багатьох галузях промисловості. Багато з цих конструкцій, розроблених десятки років тому, досі перебувають в експлуатації та є важливими економічними рушіями, в той час коли сукупний середньорічний темп зростання ринку мостових кранів збільшиться на 5,5% до 2031 року згідно розширеного аналізу ринку (Overhead Crane Market – Global Industry Analysis, 2021-2031).

Сталеві підкранові балки виконують функцію основних опор для мостових кранів та зазнають локальних динамічних повторюваних навантажень від коліс крана [1-9], що спричиняє втому металу з часом та підвищує ризик місцевого руйнування. Наслідком таких руйнувань часто є локальні тріщини в місці з'єднання полицки та стінки підкранових балок, як показують численні результати інспекцій цих конструктивних елементів (Рис. 1). Звідси виникає необхідність точності розрахунку втомної міцності цих зон вже на стадії проектування, та особливо з часом – для конструкцій, які були зпроектвані багато років тому, задля точної оцінки їх залишкового ресурсу.



Рис. 1. Типові втомні тріщини в зоні з'єднання стінки та полицки сталевих підкранових балок

Дане з'єднання може бути виконане у вигляді різних конфігурацій (Рис. 2), таких як зварених між собою пластин, прокатного профілю чи комбінованого

з'єднання у вигляді прокатного профілю привареного стиковим зварним швом до стінки балки [1, 3, 6, 8].

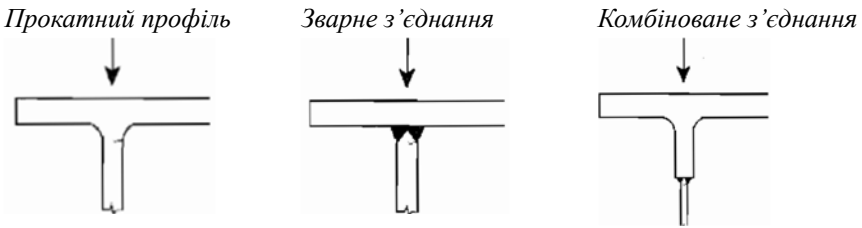


Рис. 2. Різні типи з'єднання полицки та стінки підкранових балок [6]

Використання різних конфігурацій балок, згаданих вище, не тільки прямо впливає на вартість будівництва, а й визначає втомну міцність даного з'єднання в залежності від типу та якості зварних швів, створюючи локальні концентрації напружень. Важливо підкреслити те, що в місці з'єднання полицки та стінки підкранових балок виникають переважно стискаючі напруження від коліс крана, що створюють основу для визначення класів надрізів, описаних в існуючих національних та міжнародних стандартах. Однак, складність розрахунку втомної міцності даної зони полягає в тому, що вона також піддається локальним розтягуючим та згинальним напруженням під впливом реальної роботи крана, та знаходиться в складному напружено-деформованому стані. Незважаючи на те, що вищезгадані норми несуть в собі інформаційно-рекомендаційний характер, вони не надають чітких переваг та недоліків використання та впливу того чи іншого типу з'єднання на залишковий термін служби конструкції, пропонуючи спрощену методику розрахунку напружень та витривалості [1, 3, 8].

Враховуючи постійну необхідність використання мостових кранів та їх підкранових колій, а також забезпечення ресурсу як для нових конструкцій, так і визначення залишкового терміну служби старих конструкцій, виникає необхідність у подальших наукових дослідженнях дійсної роботи з'єднання полицки та стінки підкранових балок при розрахунку на витривалість та визначення ефективності їх використання у вигляді різних конфігурацій.

**Мета роботи** – провести огляд літературних джерел щодо дослідження втомної міцності з'єднання полицки та стінки сталевих підкранових балок. Основна увага буде зосереджена на аналізі наукових джерел, присвячених дослідженню складного напружено-деформованого стану, викликаного реальною поведінкою кранів та втомної міцності даного з'єднання. Планується визначити основні виклики та можливості існуючих напрацювань, які зроблять основу для подальших досліджень, що дозволять вдосконалити існуючі методики розрахунку на витривалість та нададуть чіткі рекомендації щодо ефективності використання підкранових балок у вигляді різних конфігурацій.

**Історичний огляд.** На сьогоднішній день, проблематика розрахунку втомної міцності сталевих підкранових балок під впливом циклічних навантажень, набуває особливої актуальності та є об'єктом різноманітних наукових досліджень в Україні та за її межами. Це пов'язано з тим, що велика кількість підкранових балок була зпроектована десятки років тому, базуючись на спрощених правилах розрахунку на витривалість.

У середині 1850-1860-х років німецький інженер Август Вьойлер провів випробування металевих зразків при циклічних навантаженнях, визначивши залежність між амплітудою напружень ( $S$ ) і кількістю циклів до руйнування ( $N$ ), що сформував S-N криву (Рис. 3). Він також виявив межу витривалості – рівень напруження, нижче якого матеріал не руйнується. Ця крива є важливим інструментом для прогнозування терміну служби матеріалів, на основі якого розроблені сучасні стандарти аналізу втоми [10].

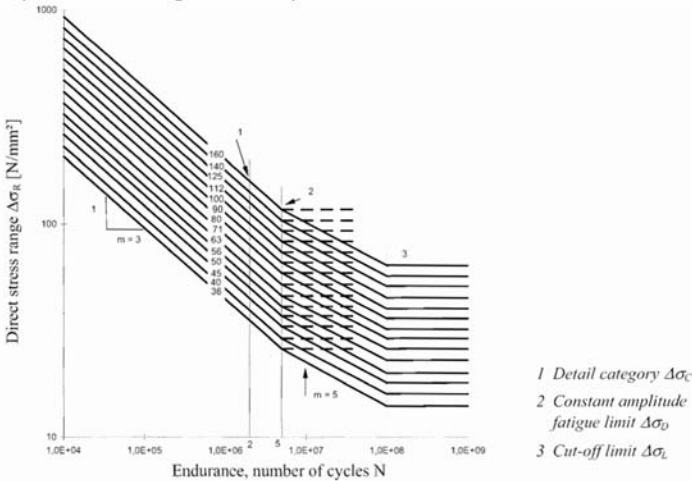


Рис. 3. Приклад модифікованої S-N кривої згідно Єврокоду [6]

Однак, у реальних інженерних застосуваннях конструкції часто зазнають змінного навантаження, а не постійного, як у випадку з підкрановими балками, які піддаються навантаженням різної величини протягом свого терміну служби. Відтак, Арвід Пальмгрен у 1924 році та пізніше М.А. Майнер у 1945 році доповнили та розширили існуючу криву Вьойлера, запропонувавши правило, яке базується на ідеї, що загальне втомне пошкодження, якого зазнає матеріал, є сумою індивідуальних пошкоджень, спричинених кожним циклом навантаження різної амплітуди. У правилі зазначено, що руйнування відбувається, коли накопичене пошкодження дорівнює або перевищує певний поріг, зазвичай прийнятий як 1 (1). Таким чином, правило Майнера не замінило криву Вьойлера, а покращило застосування аналізу втоми до більш реалістичних сценаріїв навантаження, що включають змінні напруження [11].

$$D_d = \sum_j^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (1)$$

До виходу широко відомих стандартів Єврокод, які часто використовуються європейськими країнами та за їх межами для розрахунку втомі підкранових балок, існували окремі норми для різних країн, часто визначаючи різні правила та підходи до розрахунку кранових конструкцій. Так, німецький стандарт DIN15018 був затверджений у 1984 році та використовувався у Німеччині та сусідніх країнах, в яких він був взятий за основу [12]. В цьому ж самому році вийшла оновлена версія нідерландського стандарту NEN 2019 [13], яка замінила перше видання 1976-го року. У 1987 році, Європейська федерація обробки матеріалів затвердила оновлені настанови, правила та технічні рекомендації для перевірки підіймальних конструкцій, кранів та їх шляхів, зібрані в єдиному стандарті FEM 1.001 [14], які замінили попередні видання 1962 та 1970 років. Саме ці норми стали базою для проектування більшої частини кранових конструкцій, в тому числі й для оцінки втомної міцності та їх ресурсу. Однак, з утворенням Європейського Союзу та прагненням до гармонізованих стандартів безпеки відповідно до Директиви з машин (2006/42/EC) стало необхідно розробити стандарти, які були б застосовні по всій Європі, особливо враховуючи те, що кожен із вищеописаних стандартів мав власні специфікації для навантажень, коефіцієнтів безпеки, втомної міцності та умов експлуатації, що призводило до різних підходів до безпеки кранів у різних країнах і потреби у гармонізованому, уніфікованому підході. Серія стандартів EN 13001 [2-3] та Єврокод була розроблена для заміни попередніх національних стандартів єдиним набором рекомендацій, які застосовувалися б по всій Європі. Незважаючи на те, що FEM 1.001 стандарт [14] був основою новоствореного EN13001, принциповою різницею було запровадження параметра історії напружень  $s_m$ , який по суті замінив групи компонентів, передбачих FEM 1.001, та прямо базується на підході Палмгрен-Майнера, дозволяючи враховувати втомні пошкодження сумою індивідуальних пошкоджень:

$$s_m = v \times k_m, \quad (2)$$

$$k_m = \sum_i \left[ \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma} \right]^m \times \frac{n_i}{N_t}, \quad (3)$$

$$v = \frac{N_t}{N_{ref}}, \quad (4)$$

Ранні розробки Єврокодів 80-х та 90-х років призвели до публікування фінальної версії по втомі металу у 2005 році [6]. Вона стала набагато більш розширеною версією минулих стандартів, яка також додатково включала ряд важливих факторів, які не враховувалися у вищезгаданих старіших стандартах: розрахунок напружень в зварних швах методом гарячих точок (Hot Spot Stress Method), детальніші класи надрізів для різних конфігурацій підкранових балок (проте з консервативнішими значеннями), а також

детальніша методика розрахунку напружень у місці з'єднання полицки та стінки підкранових балок, яка не описана чітко в старіших версіях окремих стандартів. Вищеописані чинники створюють суттєву різницю в оцінці довговічності конструктивних елементів, ставлячи під сумнів фактичний залишковий ресурс, а отже і безпечні умови використання кранів в майбутньому. Різниця класів надрізу між старішими стандартами DIN, EN13001 та Eurocode також виявилася значною, призводячи до відповідних економічних наслідків при проектуванні підкранових балок (Табл. 1).

Таблиця 1 [15]

Порівняння класифікацій втомги для деталей надрізу з'єднання полицки та стінки підкранових балок згідно різних стандартів

	EN 1993-1-9	EN 13001-1	DIN 4132
Notch detail	Nr. 2, Tab. 8.10	Nr. 3.11, Tab. D.3	Nr. 153, Tab. 6 (B6, $\kappa = 0$ , St 37 / St 52)
$\Delta\sigma_c$ [MPa]	71	112	200 <sup>1)</sup>
P	95 %	97,7 %	90 % (and $\gamma = 1,33$ )
$\beta$	1,645	1,995	1,282
$\Delta\sigma_{c,50\%}$ <sup>2)</sup> [MPa]	92	154	245
Difference <sup>3)</sup>	0 %	66,7 %	166 %

Нове положення в Єврокод 3 є ще більш вражаючим, оскільки результати випробувань не були використані для обґрунтування [16, 17]. Незважаючи на те, що існують більш ранні дослідження, які чітко підкреслюють кращу класифікацію, доволі консервативні припущення були зроблені, які були закладені в це положення. Крім того, обидва стандарти Eurocode 3 [1] та EN13001 [3] рекомендують розраховувати стискаючі напруження в зоні з'єднання стінки та полицки підкранових балок від локальної дії колеса крана (Рис. 4) за спрощеною формулою, згідно якої значення напруження будуть однаковими для всіх типів з'єднань (зварних / незварних):

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff}t_w} \quad (5)$$

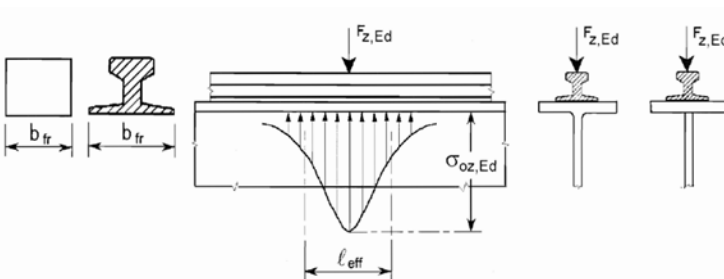


Рис.4. Ефективно навантажена довжина згідно EN 1993-6 (2007)

Ту ж саму формулу пропонує ДБН В.2.6-198:2014 (8) згідно 9.2.2. Однак, розподіл напружень для різних типів зварних швів та скруглень (у випадку прокатного профілю) буде інший, часто результиуючи в високі концентрації напружень в цьому місці. Про це у своїй науковій праці також пишуть Marcin Chybiński та Łukasz Polus [18]. Прокатні профілі зазвичай демонструють більш рівномірний розподіл напружень, знижуючи їх концентрацію і потенційно покращуючи втомні характеристики. З іншого боку, Єврокод [1] дозволяє «нехтувати напруженнями, які викликані горизонтальними зусиллями від руху крана» (EN 1993-6, 2007, с.34), незважаючи на те, що вони викликані пришвидшенням / гальмуванням крана, що є невід'ємною частиною його робочого циклу, створюючи ризик недооціненим втомним руйнуванням в підкранових балках. Важливо також підкреслити, що більшість існуючих стандартів включно з [3], [6] та [8] базуються на номінальному методі розрахунку напружень для перевірки втоми металу, який не дозволяє врахувати локальні концентрації напружень від зварних швів. В цей час, згадані стандарти не забороняють використовувати інші, більш детальні методи розрахунку, включно з методом скінченних елементів, які частково описані в міжнародному стандарті ІІW [19], проте згадані методики не корелюються з загальноприйнятими правилами розрахунку напружень в підкранових балках, описаними в [1], [3] та [8], роблячи цей процес доволі складним.

Враховуючи вищеописані фактори впливу на втомну міцність згідно існуючих норм, можна зробити висновок, що подальні дослідження в цьому напрямку допоможуть розробити більш чіткі рекомендації щодо оцінки складного НДС та втомної міцності з'єднання полицки та стінки підкранових балок.

**Експериментальні дослідження.** Як описано вище, реальна робота крана створює складний напружено-деформований стан у місці з'єднання полицки та стінки підкранових балок, який тяжко точно врахувати базуючись на спрощеній методиці розрахунку напружень згідно стандартів, в той час коли класи надрізу між різними стандартами суттєво відрізняються. Для кращого розуміння дійсної роботи сталі в цьому місці під впливом циклічних навантажень, було проведено низку експериментальних досліджень описаних нижче.

Згідно з дослідженнями Łukasz Polus, Marcin Chybiński та Zdzisław Kurzawa [18], було перевірено вплив різних варіантів з'єднань між квадратною рейкою 60x60мм та підкрановою балкою на рівень стискаючих напружень у місці приєднання стінки та полицки. Використовуючи обидва цифровий та аналітичні методи розрахунку було встановлено, що жорстке прикріплення рейки до балки дає мінімальну похибку між аналітичним методом описаним в Єврокодi та цифровим розрахунком (похибка 4-8%), в той час коли всі інші розглянуті випадки, які враховували гнучке/податливе кріплення шляхом використання еластомерної прокладки, давали суттєве відхилення від

стандарту (26%-60%), як показано на Рис. 5. Однак, варто зазначити, що дане дослідження базувалося виключно на центральному завантаженні балки, нехтуючи врахуванням ексцентреситету, гальмівних зусиль крана тощо, які призводять до додаткових згинальних напружень.

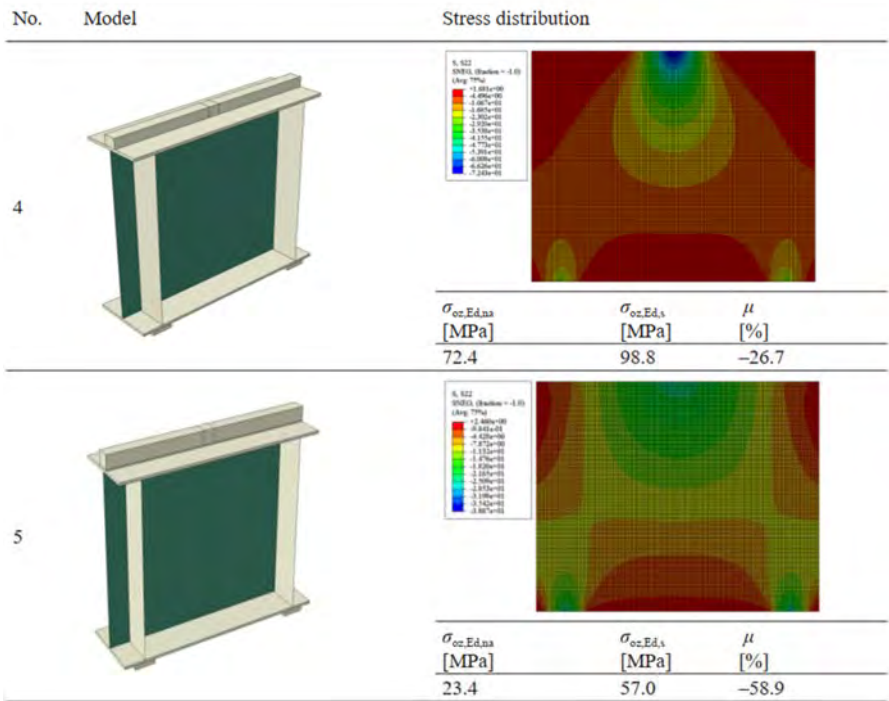


Рис.5. Приклад отриманих результатів двох підходів розрахунку [27]

У дослідженні, проведеному Sandro Citarelli та Markus Feldmann [15], було перевірено існуючі підкранові балки на вплив циклічних навантажень та оцінено щодо втомного руйнування з'єднання фланця зі стінкою. Таким чином, була отримана пряма кількісна оцінка втомного руйнування досліджуваної деталі. Крім того, класи надрізу цих з'єднань були досліджені числовим підходом, а результати обох методологій були підготовлені для пропозиції про внесення змін до чинних стандартів. Спочатку дослідження базувалися на номінальному підході розрахунку напружень, нехтуючи глобальним згином. Після цього впливи були також оцінені використовуючи класи надрізів в комбінації з більш прийнятною модифікованою гіпотезою пошкодження згідно Фіндлі. Результати показують характеристичне значення втомної міцності зі значенням в 116 МПа, що свідчить про чітку відмінність зі стандартом Єврокод, який передбачає 71 МПа для зварного з'єднання з повною проваркою (Рис. 6). Варто зазначити те, що вплив від згину не



повністю був врахований в даном дослідженні, а також не перевірені різні конфігурації підкранових балок, які спричиняють різні концентрації напружень в зоні з'єднання полицки та стінки.

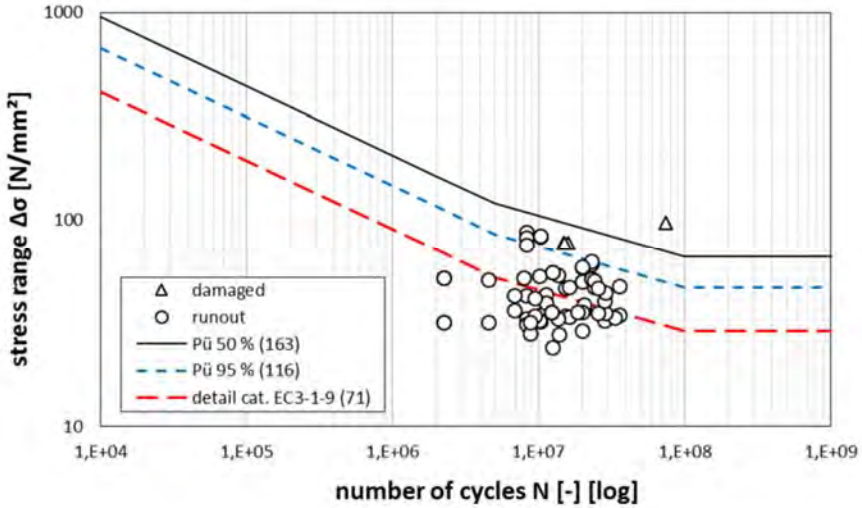


Рис.6. S-N крива номінальних напружень підкранових балок [24]

Пряця Kazimierz Rykaluk, Krzysztof Marcinczak та Sławomir Rowiński [20] присвячена дослідженню втомних руйнувань зварних підкранових балок під дією втомних навантажень. Особлива увага присвячена складному НДС стінок підкранових балок, звідки може початися процес утворення тріщин. Аналітичні формули були виведені для розрахунку цих напружень. Різниця між розрахунковими значеннями та значеннями отриманими внаслідок експериментів становить не більше 15%. Однак, слід зауважити, що дані формули не враховують неточностей пов'язаних з типом з'єднання полицки та стінки підкранових балок (зварне, прокатне та комбіноване), типом приєднання рейки до полицки (жорстке, на підкладці), а також результуючих горизонтальних зусиль від крана, які впливають на напруження в цій зоні. Крім того, було досліджено різні типи з'єднання кранових рейок між собою та їх вплив на стискаючі напруження. Для кожного типу контакту в зоні приєднання частин рейок було виявлено стрибки стискаючих напружень відносно випадку з суцільною рейкою (Рис.7). Найменше значення скачка напружень становить в ступінчастому скошеному контакті (50%), а найбільше в ортогональному контакті (близько 150%), що не враховується стандартом, та може слугувати додатковою темою для досліджень спрямованих на визначення чітких рекомендацій, як це вже сказано авторами.

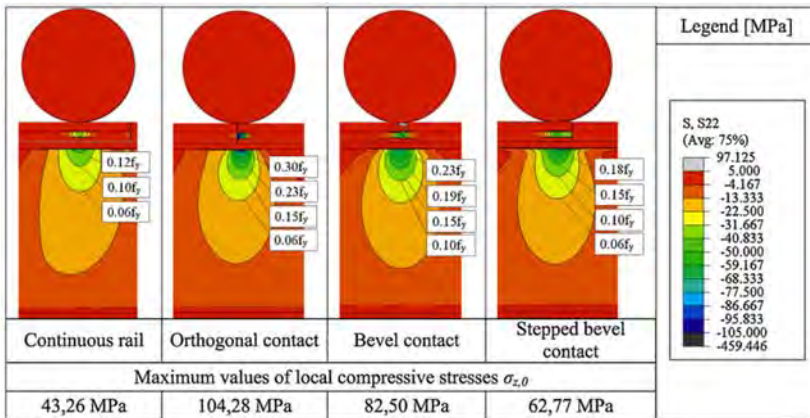


Рис. 7. Розподіл локальних стискаючих напружень [24]

У роботі Петросяна О.М. [21] аналізується вплив ексцентриситету на локальні напруження в зоні навколо шва стінки підкранової балки. Максимальний ексцентриситет становив 40 мм. Під час проведення експериментів спостерігалися "контактні плями" підшви рейки з верхньою полицею балки. Було встановлено, що лише 10 % рейок крана повністю контактували з балкою. Виявлено, що в деяких випадках ексцентриситет додатку кранового навантаження при неповному опиранні підшви рейки перевищував нормативне значення ексцентриситету при зміщенні рейки відносно вертикальної осі балки, що призводило до занижених значень напружених згідно норм. Крім того, було встановлено, що розмір розтягуючих волокон підкранових балок залежить від відстані встановлених поперечних ребер жорсткості, що спричинює локальне крутіння. В цей же час, ця відстань практично не робить якого впливу на розмір стискаючих напружень по середині балки. Слід зазначити що різні конфігурації з'єднання стінки та полицки підкранових балок не були розглянуті, а вплив ексцентриситету не враховує деформативність підкладки між рейкою та полицкою балки, і базується на жорсткій основі.

У дослідженні Ozden Caglayan, Kadir Ozakgul, Ovunc Tezer та Erdogan Uzgider [22] також встановили, що з'єднання поперечних ребер жорсткості з верхньою полицкою є місцями підвищених втомних пошкоджень, які були підтверджені експериментальними випробуваннями реальної конструкції. Однак, цей приклад не враховує різні типи кріплення рейок до балки, які впливають на локальну жорсткість, а отже і розподіл напружень в верхній зоні. Так, у своїх наукових працях важливість питання ексцентриситету навантаження від крана дослідили ряд вчених таких як: Szapiro G.A. [23], Baldin W.A. та Goriczenko [24], показуючи їх суттєвий вплив на значення втомних пошкоджень підкранових балок. Схожа теза прослідковується у праці Markus Kettler та Harald Unterweger [25], однак не бере до уваги вплив різних

конфігурацій балок на значення напружень в місці з'єднання полички та стінки.

Праці розглянуті вище, а також інші схожі дослідження демонструють основні виклики та можливості вдосконалення існуючих методик розрахунку на витривалість сталевих підкранових балок. Більшість досліджень спрямовані на розгляд поодиноких, окремих, впливів, та не беруть до уваги питання безпосереднього впливу різних типів з'єднань на їх втомну міцність під впливом складного НДС. Це потребує подальшого дослідження для визначення ефективності використання підкранових балок у вигляді різних конфігурацій.

**Висновки.** Розрахунок втомної міцності з'єднання полички та стінки сталевих підкранових балок робить визначальний вплив на забезпечення їх ресурсу та довговічності підкранових конструкцій вцілому. Існуючі дослідження показують, що важливими чинниками є втомна міцність з'єднання, яка може варіюватись в залежності від норм, та складний напружено-деформований стан цієї зони, який важко врахувати спрощеними методиками запропонованими в стандартах. Це значною мірою спричинено стискаючими напруженнями від коліс крана, та згинальними напруженнями від локального кручення, зумовленого ексцентриситетом навантаження в поєднанні з горизонтальними крановими силами, які становлять невід'ємну частину циклу. В деяких випадках ситуація є ще більш консервативною за рахунок розтягуючих напружень в зоні кріплення поперечних ребер жорсткості, та на опорах підкранових балок. Важливою залишається необхідність розгляду безпосереднього впливу різних типів з'єднань на їх втомну міцність під впливом складного НДС. Використовуючи більш детальні підходи з використанням МКЕ, це дозволить врахувати локальні концентрації напружень від зварних швів та визначити ефективність використання підкранових балок у вигляді різних конфігурацій, забезпечуючи розрахунковий ресурс конструктивних елементів.

1. EN 1993-6 (2007): Eurocode 3. *Design of steel structures - Part 6: Crane supporting structures*. Чинний від 2007-04-01. Вид. офіц. Brussels : CEN, 2007. 37 с.
2. NEN-EN 13001-2. *Crane safety - General design - Part 2: Load actions*. Чинний від 2021-03-01. Вид. офіц. Brussels : CEN, 2021. 75 с.
3. NEN-EN 13001-3-1 *Cranes - General Design - Part 3-1: Limit States and proof competence of steel structure*. Чинний від 2018-01-01. Вид. офіц. Brussels : CEN, 2018. 117 с.
4. NEN-EN 15011 *Cranes - Bridge and gantry cranes*. Чинний від 2020-12-01. Вид. офіц. Brussels : CEN, 2020. 95 с.
5. EN 1991-1-1 (2002): Eurocode 1. *Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Чинний від 2002-04-01. Вид. офіц. Brussels : CEN, 2002. 44 с.
6. EN 1993-1-9 (2005): Eurocode 3. *Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue*. Чинний від 2005-05-01. Вид. офіц. Brussels : CEN, 2005. 34 с.
7. EN 1991-3 (2006): Eurocode 1. *Actions on structures - Part 3: Actions induced by cranes and machinery*. Чинний від 2006-07-01. Вид. офіц. Brussels : CEN, 2006. 46 с.
8. ДБН В.2.6-198:2014: *Сталеві конструкції. Норми проектування*. [Чинні від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 199 с.

DBN V.2.6-198:2014: *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia*. [Chynni vid 2015-01-01]. Vyd.ofits. Kyiv:Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy, 2014. 199s

9. ДБН В.1.2-2:2006: *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування*. [Чинні від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінбуд України, 2007. 42 с.

DBN V.1.2-2:2006: *Systema zabezpechennia nadiynosti ta bezpeky budivnyh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia*. [Chynni vid 2015-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy, 2006. 42 s

10. Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs. *Metal Fatigue in Engineering (2<sup>nd</sup> edition)*. New York: Wiley-Interscience, 2000. 472 s.

11. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural reliability analysis and prediction (3<sup>rd</sup> edition)*. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. 528 с.

12. DIN 15018 Cranes – Principles relating to steel structures. Чинний від 1984-11-01. Вид. офіц. Brussels : ISO, 1984. 38 с.

13. NEN 2019 Cranes – The metal structure. Чинний від 1984-04-01. Вид. офіц. Delft: NNI, 1984

14. FEM 1.001 Rules for th design of hoisting appliances. Чинний від 1987-10-01. Вид. офіц. Paris: Technical Committee of the F.E.M, 1987

15. Citarelli S., Feldmann M. Derivation of a new fatigue class for top flange to web junctions of runway beams. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Т. 19. С. 336–345. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.037> (дата звернення: 15.09.2024)

16. Versuchsbasierte Ermüdungsfestigkeit von Konstruktionsdetails mit Radlasteinleitung / U. Kuhlmann та ін. *Stahlbau*. 2015. Т. 84, № 9. С. 655–666. URL: <https://doi.org/10.1002/stab.201510312> (дата звернення: 05.03.2024).

17. Mathias Euler. Ermüdungsverhalten nicht durchgeschweißter Konstruktionsdetails mit mehrachsiger Beanspruchung aus Radlasteinleitung (Dissertation). *ResearchGate*. 2016. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/338645904\\_Ermuadungsverhalten\\_nicht\\_durchgeschweisster\\_Konstruktionsdetails\\_mit\\_mehrachsiger\\_Beanspruchung\\_aus\\_Radlasteinleitung\\_Dissertation](https://www.researchgate.net/publication/338645904_Ermuadungsverhalten_nicht_durchgeschweisster_Konstruktionsdetails_mit_mehrachsiger_Beanspruchung_aus_Radlasteinleitung_Dissertation) (дата звернення 05.03.2024)

18. Polus Ł., Chybiński M., Kurzawa Z. Local vertical compressive stress in the crane runway beam web. *Budownictwo i Architektura*. 2022. Т. 21, № 4. С. 051–066. URL: <https://doi.org/10.35784/bud-arch.3231> (дата звернення: 03.09.2024).

19. IIW document IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Чинний від 2008-12-01. Вид. офіц. Paris: IIW, 2008

20. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowiński S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders – Locations, causes and calculations. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. Т. 18, № 1. С. 69–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.05.003> (дата звернення: 05.12.2023)

21. Петросян О.М. Вплив експлуатаційних чинників на напружений стан верхньої зони стінки підкранової балки. *Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського*. 2002. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000221996> (дата звернення 26.02.2024)

Petrosian O.M. Vplyv ekspluatatsiinykh chynnykiv na napruzheniy stan verkhnoi zony stinky pidkranovoi balky. *Natsionalna biblioteka Ukrainy imeni V.I. Vernadskoho*. 2002. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000221996> (дата звернення 26.02.2024)

22. Fatigue life prediction of existing crane runway girders / O. Caglayan та ін. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. Т. 66, № 10. С. 1164–1173. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.009> (дата звернення: 21.06.2024).

23. Szapiro G.A. Load stresses in a beam web due to eccentric load. *Structural Mechanics and Calculation*. 1959. Т.5. С. 6

24. Bałdin W.A., Gorpichenko W. M. Rasczot na wynosliwost wierchniej zony stienki podkranowoj balki. *Stroitel'naja mehanika i rasczot sooruzenij*. 1976. Т.4. С. 34-38

25. Kettler M., Kiem F., Unterweger H. Local stresses in retrofitted crane runway girders with boxed upper flange due to eccentric wheel loading. *Structures*. 2020. Т. 25. С. 646–659. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.024> (дата звернення: 05.12.2023).