

# КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ У СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ З ОДНОСТОРОННІМ ПІДСИЛЕННЯМ (Огляд)\*

**А.В. Молтасов, П.М. Ткач, І.Г. Ткач, В.В. Верушкін**

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Міцність деталей та елементів конструкцій за наявності зварних швів в значній мірі залежить від конструктивного оформлення їх з'єднань та вузлів. Різка зміна геометричної форми в їх околі обумовлює появу додаткових місцевих напружень або їх концентрацію. Величина цих напружень залежить від конструктивної форми спряження окремих елементів, тому вони по-різному можуть впливати на міцність зварних конструкцій. Концентрація напружень в зоні переходу від шва до основного металу чинить суттєвий вплив на опір втомі зварних з'єднань. При пружному деформуванні кількісною мірою концентрації напружень служить теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, який не залежить від властивостей матеріалу, а при заданому виді деформації на його величину впливають лише геометричні параметри концентратора напружень, такі як його форма та відносні розміри. На практиці теоретичний коефіцієнт концентрації напружень визначається за наближеними залежностями, а також за допомогою аналітичних, експериментальних та чисельних методів дослідження напруженого стану. Опис і аналіз зазначених методів є метою представленого огляду. Бібліогр. 37, рис. 2.

*Ключові слова:* стикове зварне з'єднання, одностороннє підсилення, осьове навантаження, напружений стан, розтягування, згинання, концентрація напружень

При статичних навантаженнях ефект концентрації є незначним, оскільки руйнування відбувається під дією напружень, що перевищують межу текучості матеріалу деталі, і йому передують значні пластичні деформації, внаслідок яких нерівномірність розподілу напружень зменшується як по контуру, так і по перерізу деталі. Однак значна кількість деталей машин та елементів конструкцій загального та спеціального призначення в процесі експлуатації сприймають велику кількість змін тимчасових навантажень, наприклад, рухомих вантажів, транспорту, хвиль, вітру тощо. Змінні навантаження, що виникають при цьому, можуть викликати втомне руйнування цих конструктивних елементів.

Втомне руйнування відрізняється від статичного тим, що воно може бути наслідком прикладення невисоких напружень, іноді значно менших за межу текучості (багатоциклова втома), тому зазвичай воно відбувається без помітної попередньої макропластичної деформації. Таким чином, ефект вирівнювання напружень після досягнення межі текучості відсутній, тому циклічні навантаження чутливі до концентрації напружень, а різного роду виточки, галтелі, отвори, надрізи, переходи зварних швів на основний метал тощо є потенціальними місцями передчасного зародження втомних тріщин.

Для стикових зварних з'єднань формування зон підвищеної навантаженості обумовлено під-

силенням шва, а технологія та режим зварювання визначають його основні параметри. Так, при дуговому зварюванні зовнішній вигляд і розміри шва залежать від способу зварювання, зварювальних матеріалів, виду розділки кромок тощо. Наприклад, згідно з ГОСТ 14771-76 з'єднання С7, С25, С26 та С27 мають однакові розміри підсилення на лицьовій та кореневій сторонах, а з'єднання С2, С4, С9, С17, С18 та С22 допустимо виконувати без підсилення на кореневій стороні, тобто вони можуть мати одностороннє підсилення.

До основних геометричних параметрів стикових швів відносять ширину  $g$  та висоту  $h$  підсилення шва, фланговий кут  $\theta$  та радіус переходу від шва до основного металу  $r$  (рис. 1). Ширина і висота підсилення визначають загальний обрис стикового шва, тоді як фланговий кут і радіус переходу від шва до основного металу характеризують гостроту концентратора в локальних зонах [1]. Тому у випадку ідеального стикового зварного з'єднання, у якого відсутні такі дефекти, як лінійні та кутові деформації в процесі зварювання, теоретичний коефіцієнт концентрації напружень (ККН) визначається двома незалежними складовими, перша з яких (конструктивний ККН)  $\alpha_{ог}$  обумовлена загальною геометрією зварного вузла та товщиною з'єднаних елементів, а друга (локальний ККН)  $\alpha_{отв}$  — геометрією зони переходу

\*Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України, за конкурсним проектом Ф75 Державного фонду фундаментальних досліджень

© А.В. Молтасов, П.М. Ткач, І.Г. Ткач, В.В. Верушкін, 2019

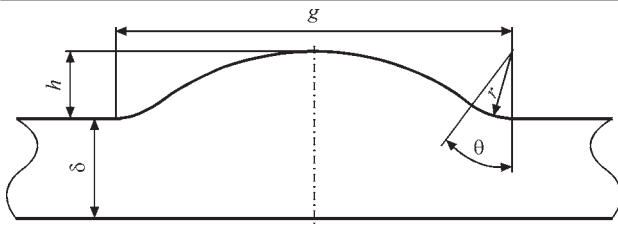


Рис. 1. Основні геометричні параметри стикового зварного з'єднання з одностороннім підсиленням

від шва до основного металу [2]. Тоді максимальне напруження  $\sigma_{\max}$  буде визначатися формулою

$$\sigma_{\max} = \alpha_{\sigma g} \alpha_{\sigma w} \sigma_{\text{ном}}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{\text{ном}}$  — номінальні напруження, що діють на достатній відстані від концентратора.

На практиці такий підхід реалізовано в методі напруження в гарячій точці, який був розвинутий науковцями Британського інституту зварювання, зокрема С.Дж. Медоксом та Е. Ніємі [3, 4], та німецьким вченим А.Ф. Хобахером [5] для вирішення задач втомної міцності зварних вузлів. Вплив загальної геометрії з'єднання та геометрії зони спряження шва зі з'єднуваними пластинами на витривалість конструктивного елемента для заданого змінного навантаження у вказаному методі розглядаються при розрахунках окремо.

Оскільки градієнт напружень в зоні переходу від шва до основного металу дуже високий, напруження, розраховані за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) в цій зоні, дуже чутливі до розміру сітки скінченних елементів [6]. Тому конструктивна складова напружень, зумовлена загальною геометрією з'єднання, визначається за допомогою комп'ютерної моделі досліджуваного зварного вузла, що не включає шов, шляхом екстраполяції напружень, розрахованих в контрольних точках на деякій відстані від шва. Зокрема, при лінійній екстраполяції контрольні точки знаходяться на відстані  $0,5\delta$  та  $1,5\delta$  від лінії сплавлення металу шва з основним металом на поверхні з'єднання.

Кількість циклів до руйнування вузла при заданій величині змінного навантаження можна отримати, відмітивши на кривій втоми для стикового зварного з'єднання з каталогу FAT (File Allocation Table) знайдене значення розмаху конструктивних напружень, тобто таких, що визначаються конструктивним ККН  $\alpha_{\sigma g}$ . Використання цих каталогів при розрахунках дозволяє врахувати вплив зварного шва, оскільки ці каталоги включають ряд кривих втоми, отриманих за результатами випробувань на витривалість реальних зварних елементів і виражених у величинах розмаху номінальних напружень незалежно від коефіцієнта асиметрії циклу прикладення навантажень [7].

Очевидно, що криві втоми реальних зварних з'єднань враховують вплив на опір втоми залишкових зварювальних напружень та механічної неоднорідності ділянок зони термічного впливу, але даний підхід не дає змоги визначити локальний напружений стан в деякому околі концентратора напружень. Тому при розрахунках на втому використовуються методи, що базуються на визначенні ефективного локального ККН  $K_{\sigma w}$ , який залежить не тільки від геометричної форми зони переходу від шва до основного металу, а й від деяких констант матеріалу, таких як коефіцієнт чутливості до концентрації напружень [1], критична відстань [8] або розмір структурного елемента [9].

Найбільш широкого використання набув спосіб визначення ефективного локального ККН у форматі методу фіктивного закруглення концентратора напружень, запропонованого німецьким вченим Д. Радаєм [10]. Цей метод базується на припущенні про те, що при розрахунках теоретичного локального ККН  $\alpha_{\sigma w}$  береться значення дійсного радіусу кривизни концентратора, а при розрахунках ефективного локального ККН  $K_{\sigma w}$  береться значення фіктивного радіусу, який визначається мінімальними розмірами структурного елемента та жорсткістю напруженого стану [11].

За результатами випробувань на втому понад 1000 зразків зварних з'єднань різної форми та розмірів встановлено, що спільний радіус ефективного концентратора для сталей становить 1 мм [12]. Оцінки ефективного локального ККН, як правило, виконуються на базі відомого теоретичного локального ККН, а його реальна величина визначається експериментально як відношення межі витривалості гладкого зразка до межі витривалості зразка з концентратором напружень [1], тому використання універсального фіктивного радіуса для цілого класу матеріалів може дати відмінні від експерименту результати.

Слід пам'ятати, що розглянуті методи можуть бути застосовані лише для визначення характеристик опору втоми, хоча досвід показує, що з концентрацією напружень необхідно рахуватися не тільки при дії вібраційного навантаження, а й статичного навантаження та удару, якщо можливе крихке руйнування конструкції. Так, при роботі зварних з'єднань в умовах низьких температур перехід металу в крихкий стан залежить не тільки від температури експлуатації, а й від інших факторів, особливо від концентрації напружень, яка для конструкцій криогенної техніки являється одним з головних факторів, що визначають їх міцність та ресурс [13]. Тому оцінка саме теоретичного локального ККН є одним з основних за-

побіжників передчасного руйнування зварних вузлів та елементів конструкцій.

Аналітичні розрахунки на міцність зварних з'єднань, що засновані на методах опору матеріалів, не враховують особливостей умов розподілу напружень в місцях зміни форми елементів конструкцій, а тому не можуть бути використані для розв'язання задач щодо визначення концентрації напружень.

Теорія пружності, будучи вільною від багатьох припущень, прийнятих для спрощення в опорі матеріалів, дозволяє вирішувати питання, які виходять за рамки обмежень, накладених цими припущеннями, і являється більш загальною теорією, але водночас і більш складною, а її використання в багатьох випадках супроводжується складними викладками.

Значного спрощення задачі в ряді випадків можна досягти, застосовуючи метод перерізів, який полягає в розділенні складного зварного з'єднання на ряд простих елементів із заміною підсилення шва еквівалентною дією відповідних зусиль, що дозволяє використати відомі заздалегідь розв'язки теорії пружності.

За рахунок підсилення шва в районі збільшення поперечних перерізів виступаючі частини обмежують деформації основних елементів з'єднання, спричиняючи місцеве викривлення перерізів і зміну умов розподілу силового потоку. Обмежувальну дію виступів можна вважати рівноцінною дії деяких поверхневих горизонтальних зусиль, якими являються дотичні напруження, прикладені в місці підсилення [14].

Застосовуючи метод перерізів, можна відкинути місцеве підсилення і замінити їх вплив дією еквівалентних зусиль, тоді розрахункову схему зварного з'єднання можна зобразити у вигляді основного елемента постійного поперечного перерізу без змін форми, на який крім зовнішнього навантаження діють ще деякі зусилля, прикладені в місцях уявного відділення виступаючих частин (рис. 2).

Знаючи закон розподілу еквівалентних зусиль, можна використати вже відомі в теорії пружності розв'язки щодо смуги навантаженої на кромках чи торцях розподіленими нормальними або дотичними зусиллями [15] та визначити нормальні напруження в місцях геометричної неоднорідності стикового зварного з'єднання.

Використовуючи метод перерізів, в роботі [14] був отриманий розв'язок задачі у замкненій формі щодо спрощеної моделі стикового з'єднання з прямокутним підсиленням.

Врахування криволінійної форми виступів реальних стикових швів значно ускладнює диферен-

ціальне рівняння для визначення еквівалентних дотичних напружень, прикладених на місці умовного відділення виступу. Навіть при використанні спрощеної моделі виступу у вигляді симетричних відносно осі шва нахилених прямих [14] це рівняння являє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку зі змінними коефіцієнтами.

Задоволення умов на границі з подібним по формі до підсилення стикового зварного шва виступом можливе у криволінійних координатах, але тоді виникає проблема із задоволенням умов на прямолінійній границі, тому вперше німецьким вченим Г. Нейбером було знайдено аналітичний розв'язок плоскої задачі теорії пружності щодо розтягу напівнескінченної пластини з виступом [9]. Ним була підібрана така система ортогональних криволінійних координат, що одна з координатних ліній утворює виступ, і визначена функція напружень, яка задовольняє граничні умови задачі. Максимальне напруження на контурі з'єднання та геометричні розміри виступу визначалися через параметр контурної лінії, однак зворотній зв'язок між цим параметром та розмірами виступу встановити неможливо, тому залежність максимального напруження від відношення  $g/r$  представлена у вигляді графіку. Слід мати на увазі, що цей графік може бути використаний тільки для виступів з відношенням  $g/2r \geq 4\sqrt{3}$ . Це пов'язано з тим, що за півширину виступу прийнято відстань від його осі симетрії до точки, в якій контур паралельний до цієї осі. У виступів, розміри яких не задовольняють цій умові, така точка взагалі відсутня, а параметр контуру є комплексним числом, тому в цьому діапазоні максимальне напруження визначити неможливо [16].

Крім того, залежність максимального напруження від відношення  $g/r$  передбачає збільшення максимального напруження не тільки зі зменшенням радіусу переходу шва на основний метал, а й зі збільшенням ширини виступу, що не підтверджується експериментальними даними. Зокрема в роботі [17] поляризаційно-оптичним методом для спрощених моделей зварного з'єднання з  $r = 0,5$  мм та  $h = 5$  мм було встановлено, що величина локального ККН при осьовому розтягу

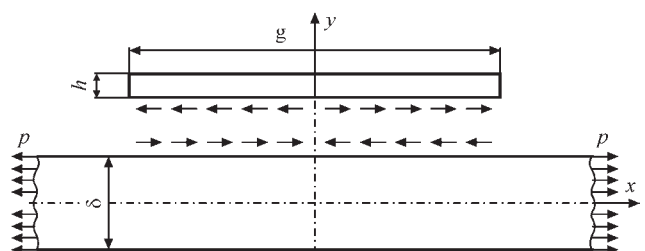


Рис. 2. Схема навантаження окремих частин моделі стикового зварного з'єднання з прямокутним виступом

зі збільшенням ширини шва з 5 до 25 мм зменшується з 1,60 до 1,59, а максимальне його значення 1,61 було зафіксовано при  $g = 8$  мм. Такі незначні відхилення величини локального ККН як в бік збільшення, так і в бік зменшення, скоріше за все, пов'язані з похибкою вимірювання або відхиленнями інших геометричних розмірів моделей, на підставі чого можна зробити висновок, що він не залежить від ширини виступу.

Єдиний параметр контурної лінії, яким в роботі [9] задаються розміри та форма виступу, не дозволяє задавати основні геометричні характеристики підсилення зварного шва незалежно одна від іншої, тому в роботі [18] за допомогою методу конформного відображення була вирішена більш загальна задача теорії пружності. Функцію відображення було задано у вигляді ряду, утримуючи більшу кількість членів якого, можна зменшувати радіус спряження виступу з пластиною, а варіюючи коефіцієнти при його членах змінювати відношення  $h/g$ .

Недоліком такого підходу є те, що розміри і форма виступу, як і в [9], визначаються параметрами контурної лінії, що задаються функцією відображення, тому наближену формулу для визначення локального ККН в стиковому зварному з'єднанні достатньо великої товщини можна встановити тільки шляхом статистичної обробки.

Оскільки при конформному відображенні окресленої одиничним колом області або області, що знаходиться поза цим колом, на замкнений багатокутник отримання області із заданими відносними розмірами є досить складною задачею, тому для того щоб врахувати вплив всіх параметрів, що визначають форму реальних зварних з'єднань, на напружений стан, необхідно аналізувати функції з достатньо великою кількістю членів ряду.

Завдяки використанню чисельного алгоритму конформного відображення заданих однозв'язних симетричних областей методом спільної інтеполяції координат вузлових точок і побудові відображуючих функцій на великій кількості цих точок в роботі [19] шляхом апроксимації аналітичних розв'язків була отримана формула для визначення теоретичного локального ККН. Однак, згідно з отриманою формулою, цей ККН зменшується із збільшенням товщини з'єднуваних пластин, що не підтверджується результатами розрахунків МСЕ [20], які показали, що зі збільшенням товщини місцеві напруження зростають.

Недостовірність результатів, отриманих з використанням такого підходу щодо скінченних областей типу пластини змінної товщини, пояснюється тим, що при представленні функції ві-

дображення у вигляді ряду можливе виникнення варіацій контурних напружень внаслідок недостатньої гладкості отриманого контуру. Тому врахування впливу товщини пластин досягалося шляхом обробки додаткових експериментальних даних, що дозволило отримати формулу [21]

$$\alpha_{\sigma_w} = 1 + \frac{1}{\sqrt{r \left( \frac{14}{g} + \frac{1,7}{h} + \frac{5}{\delta} \right)}} \quad (2)$$

Розвиток обчислювальної техніки і чисельних методів розв'язування задач теорії пружності, зокрема МСЕ, призвів до того, що традиційні експерименти по визначенню напруженого стану в зонах концентрації на натурних зразках були замінені чисельними експериментами на скінченно-елементних моделях. Статистична обробка результатів аналітичних або чисельних розв'язків задач теорії пружності або експериментальних даних дає змогу отримати емпіричні залежності для визначення локального ККН, які мають загальний вигляд

$$\alpha_{\sigma_w} = 1 + Ar^{-n}, \quad (3)$$

де  $A$  — параметр, що враховує макрогеометрію з'єднання і умови його навантаження.

Велика кількість запропонованих залежностей типу (3) викликає певні ускладнення при вирішенні питання, якою з них слід скористатися в кожному конкретному випадку. Так, за даними огляду [22], показник ступеню  $n$  у цих залежностях змінюється в межах 0,3...0,67.

Авторами роботи [23] шляхом відповідної статистичної обробки результатів розрахунків за найбільш вживаними формулами теоретичного локального ККН при заданих значеннях числових параметрів, що характеризують форму зварного шва, було встановлено, що найбільш універсальною при зміні в широкому діапазоні геометричних параметрів і рекомендованою для практичного застосування є формула Березовського–Бакші

$$\alpha_{\sigma_w} = 1 + \left( \frac{r}{h \tan(\theta/2)} + 4 \frac{r}{\delta} + 5 \frac{r}{r+g} \right)^{-\frac{2}{3}}, \quad (4)$$

яка для стикових зварних з'єднань з одностороннім підсиленням дає достовірний результат при відношеннях  $r/\delta = 0,01...0,1$  та  $h/\delta = 0,1...0,2$ .

Проблема полягає в тому, що тонколистові з'єднання не відповідають областям достовірності цієї та інших формул, проаналізованих в роботі [23]. Так, для стикового з'єднання типу С7 згідно ГОСТ 8713-79 при товщині зварюваних пластин  $\delta = 2...3$  мм висота підсилення  $h$  може змінюватись в межах 0,5...2,5 мм, відповідно відношення  $h/\delta$  лежить в межах 0,17...1,25.

Невідповідність розрахункових даних, отриманих за емпіричними формулами з роботи [23], зоні «достовірних рекомендацій» при розтягу зварних з'єднань малої товщини, асиметричних відносно осі прикладення зовнішнього навантаження, можна пояснити додатковим згином, викликаним цією асиметрією.

На ці обставини вказав білоруський вчений Ю.О. Цумарев в роботі [24], де зазначив, що наявність згинальних напружень в тонколистових зварних з'єднаннях з одностороннім підсиленням призводить до значного підвищення сумарної напруженості в кореневій частині та її зниження в лицьовій частині зварного шва. За даними цієї роботи при осьовому розтягу навантаженням 200 МПа стикового зварного з'єднання з відношенням  $h/\delta = 0,5$  максимальне напруження в зоні переходу від шва до основного металу склало 240 МПа, а в кореневій частині на ділянці з підсиленням — 260 МПа. Очевидно, що максимальні напруження в зоні переходу від шва до основного металу можна визначити використовуючи локальний ККН  $\alpha_{\sigma_w}$ , розрахований за будь-якою з формул, наведених в [23]. Однак максимальні напруження діють на кореневій стороні, де локальний концентратор напружень відсутній ( $\alpha_{\sigma_w} = 1$ ), а додаткові напруження згину враховуються за допомогою конструктивного ККН  $\alpha_{\sigma_{sg}}$ , який згідно з [25] визначається формулою

$$\alpha_{\sigma_{sg}} = \frac{\delta(\delta + 4h)}{(\delta + h)^2}. \quad (5)$$

Результати розрахунків Ю.О. Цумарева підтверджуються експериментальними даними, накопиченими протягом багатьох років у відділі міцності зварних конструкцій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в результаті випробувань на багатоциклову втому стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, які показали, що в тонколистових стикових з'єднаннях з одностороннім підсиленням зародження втомного руйнування іноді починається саме з кореневої сторони зварного шва.

В роботі [25] для визначення напруження на кореневій стороні зварного шва  $\sigma_r$  було запропоновано формулу

$$\sigma_r = P \frac{\delta + 8e}{(\delta + 2e)^2}, \quad (6)$$

де  $P$  — осьове навантаження, що діє на одиницю ширини зварного з'єднання;  $e$  — ексцентриситет прикладення осьового навантаження.

Згідно з викладками роботи [25] напруження на лицьовій стороні шва ( $\sigma_f$ ) можна визначити за формулою

$$\sigma_f = P \frac{\delta - 4e}{(\delta + 2e)^2}. \quad (7)$$

Аналіз цієї формули показує, що вона дійсно не враховує геометричні параметри зони переходу від шва до основного металу та підвищення напружень на лицьовій стороні з'єднання, яке, як відомо, для задоволення умов рівноваги у відповідних перерізах має бути компенсоване деяким зниженням напружень на кореневій стороні. Тому реальну картину полів напружень часто визначають за допомогою комп'ютерного моделювання МСЕ. Однак суттєвим недоліком такого підходу є те, що при моделюванні варіюються висота та ширина підсилення [26], а плавний перехід по радіусу від металу шва до основного металу не моделюється, хоча відомо, що домінуючий вплив на величину максимального напруження має цей радіус [27, 28].

Якщо розраховувати локальний ККН без урахування радіуса спряження, то він скоріше характеризуватиме не напружений стан зварного з'єднання, а сітку скінченних елементів [29]. Крім того, за наявності гострих концентраторів використання локального ККН не видається перспективним у зв'язку із сингулярністю напружень в їх околі [30]. В такому випадку зону переходу від шва до основного металу можна представити з точки зору механіки руйнування як кутовий виріз з відомим розподілом напружень поблизу його вершини [31].

При малих відносних радіусах переходу від шва до основного металу кількість скінченних елементів, необхідна для отримання достовірних результатів, дуже велика (сторона елемента не більше 10 % радіуса) [32]. Проводити розрахунки з такою детальною апроксимацією елементів досить складно. Такі розрахунки потребують використання потужної обчислювальної техніки і виконуються лише у виняткових випадках [33]. Тому для того, щоб скоротити об'єм обчислень при розрахунку зварного з'єднання, доцільно використовувати математичні формули для визначення коефіцієнта  $\alpha_{\sigma_w}$ , а коефіцієнт  $\alpha_{\sigma_{sg}}$  розраховувати за допомогою МСЕ та доступної системи інженерного аналізу [34].

У випадку, коли діють не тільки напруження розтягу, а й напруження згину, не можна скористатися формулою (1), оскільки сучасні методики [35, 36] полягають у визначенні конструктивних напружень розтягу та згину з подальшим множенням кожного з них на відповідний ККН. Так, в роботі [36] було запропоновано розкласти напруження, розподілені по товщині, на напруження розтягу-стиску (мембранні напруження)  $\sigma_m$  та на-

пруження згину  $\sigma_b$  і визначати максимальні напруження за формулою

$$\sigma_{\max} = \alpha_{\sigma_w}^m \sigma_m + \alpha_{\sigma_w}^b \sigma_b, \quad (8)$$

де  $\alpha_{\sigma_w}^m$ ,  $\alpha_{\sigma_w}^b$  — ККН при розтягу та згині, відповідно.

Очевидно, що в цьому випадку немає необхідності застосовувати конструктивний ККН  $\alpha_{\sigma_{ог}}$ , оскільки згинальні напруження враховуються окремо.

На базі гіпотези ламаних перерізів в роботі [37] було розроблено аналітичний метод дослідження локального напруженого стану в зонах концентрації напружень стикових зварних з'єднань з одностороннім підсиленням, який враховує ексцентриситет прикладання осевого навантаження та локальну геометрію зони переходу від шва до основного металу. За допомогою цього методу були отримані математичні вирази для визначення напружень на поверхні зони переходу від шва до основного металу та на кореневій стороні шва.

## Висновки

1. Теоретичний ККН в стикових зварних з'єднаннях визначається двома незалежними складовими, перша з яких (конструктивний ККН) обумовлена загальними обрисами зварного вузла та товщиною з'єднаних елементів, а друга (локальний ККН) — геометрією зони переходу від шва до основного металу.

2. В якості конструктивної складової напружень при розтягу стикових зварних з'єднань з одностороннім підсиленням виступають напруження згину, які враховуються за допомогою конструктивного ККН. Якщо висота підсилення сумірна із товщиною з'єднаних пластин, що характерно для тонколистових з'єднань, сумарні напруження від розтягу та згину на кореневій стороні шва, не дивлячись на відсутність локального концентратора, можуть бути вищими ніж в зоні переходу від шва до основного металу.

3. Конструктивний ККН для умовної форми підсилення може бути визначений аналітично методами опору матеріалів або за допомогою МСЕ. Обмеження області застосування МСЕ пов'язано з високою трудомісткістю при побудові точної, навіть двовимірної моделі зі щільною локальною сіткою. Тому для визначення локального ККН використовують емпіричні залежності, отримані шляхом статистичної обробки результатів аналітичних та чисельних розв'язків задач теорії пружності або експериментальних даних.

4. Область достовірності наявних на сьогоднішній день розрахункових залежностей для визначення локального ККН виключає мож-

ливість їх застосування щодо тонколистових стикових зварних з'єднань. Крім того, числове значення локального ККН не дає інформації про перерозподіл напружень по товщині з'єднання, зокрема і на кореневій стороні шва, внаслідок їх концентрації в зоні переходу від шва до основного металу. Тому при розрахунках з'єднань з одностороннім підсиленням не можна обмежуватись лише оцінкою ККН, а необхідно визначати напруження на лицевій та кореневій сторонах шва.

5. Найбільш ефективними для визначення напруженого стану в околі підсилення зварного шва є комбіновані методики, згідно з якими напруження в локальних зонах переходу від шва до основного металу визначаються за математичними формулами, отриманими аналітичними шляхом, а напруження на достатній відстані від гострих концентраторів за допомогою комп'ютерного моделювання МСЕ.

## Список литературы

1. Труфяков В.И., Дворецкий В.И., Михеев П.П. и др. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. В.И. Труфяков (ред.). Киев, Наукова думка.
2. Gafner E., Haibach E. (1968) Die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. *Fachbuchreihe Schweißtechnik*, Bd. 53. Tragfähigkeitsermittlung bei Schweißverbindungen, Düsseldorf, Verlag Schweißtechnik, ss. 47–73.
3. Мэддокс С.Дж. (2003) Совершенствование правил расчёта на усталость сварных соединений. *Автоматическая сварка*, № 11, 97–104.
4. Niemi E., Fricke W., Maddox S.J. (2006) *Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited.
5. Hobbacher A. (2008) *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Paris, International Institute of Welding.
6. Yong Bai and Wei-Liang Jin (2015) *Marine Structural Design*. Oxford, Elsevier Publishing.
7. Maddox S.J. (1991) *Fatigue strength of welded structures*. Cambridge, Abington Publishing.
8. Herasymchuk Oleh, Herasymchuk Olena (2017) Theoretical estimation of fatigue life under regular cyclic loading. *Mechanics and Advanced Technologies*, 1 (9), 49–56.
9. Neuber H. (2001) *Kerbspannungslehre: Theorie der Spannungskonzentration Genaue Berechnung der Festigkeit*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
10. Radaj D., Sonsino C.M., Fricke W. (2006) *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd.
11. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. (2016) Анализ и классификация методов оценки усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна. *Вестник ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова*, 3, 104–118.
12. Хоббахер А.Ф. (2003) Расчет на усталость сварных конструкций по напряжениям в зоне концентратора. *Автоматическая сварка*, № 11, 122–126.
13. Воробьев Е.В., Стрижало В.А., Анпилогова Т.В. (2017) Упрочнение сталей при охлаждении до 4,2 К в условиях концентрации напряжений. *Проблемы прочности*, 5, 5–10.
14. Навроцкий Д.И. (1968) *Расчет сварных конструкций с учетом концентрации напряжений*. Ленинград, Машиностроение.

15. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. (1975) *Теория упругости*. Пер. с англ. Г.С. Шапиро (ред.). Москва, Наука.
16. Копельман Л.А. (1978) *Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению*. Ленинград, Машиностроение.
17. Труфьяков В.И. (1973) *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
18. Кархин В.А. (1985) Влияние формы сварного шва на распределение напряжений при растяжении стыковых соединений большой толщины. *Автоматическая сварка*, **9**, 25–28.
19. Турмов Г.П. (1976) Определение коэффициента концентрации напряжений в сварных соединениях. *Там же*, **0**, 14–16.
20. Стаканов В.И., Костылев В.И., Рыбин Ю.И. (1987) О расчете коэффициента концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях. *Там же*, **11**, 19–23.
21. Кархин В.А., Копельман Л.А. (1976) Концентрация напряжений в стыковых соединениях. *Сварочное производство*, **2**, 6–7.
22. Tkacz P., Moltasov A. (2017) Rozwój metod oceny stanu naprężenia w elementach konstrukcji spawanych. Część 1. Metody tradycyjne. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **4**, 52–56.
23. Махненко В.И., Мосенкис Р.Ю. (1985) Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами. *Автоматическая сварка*, **8**, 7–18.
24. Цумарев Ю.А. (2010) Влияние асимметрии односторонних стыковых швов на распределение напряжений в сварном соединении. *Сварка и диагностика*, **5**, 24–27.
25. Цумарев Ю.А. (2010) Влияние внецентренного растяжения на напряженное состояние стыкового сварного соединения. *Сварочное производство*, **6**, 6–10.
26. Ермолаев Г.В., Мартыненко В.А., Марунич И.В. (2014) Влияние размеров выпуклости шва на напряженное состояние стыкового соединения при растяжении. *Автоматическая сварка*, **8**, 28–34.
27. Gurney T.R. (1979) *Fatigue of welded structures*. Second edition, London, New York. Melbourne, Cambridge University Press.
28. Аснис А.Е., Иващенко Г.А., Андерсон Я.Е. (1982) Влияние радиуса сопряжения шва с основным металлом на сопротивление усталости сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **4**, 48–51.
29. Кархин В.А., Костылев В.И., Стаканов В.И. (1988) Влияние геометрических параметров стыковых, тавровых и крестовых соединений на коэффициент концентрации напряжений. *Там же*, **3**, 6–11.
30. Лукьянов В.Ф., Пархоменко А.А., Рогозин Д.В. (2010) Оценка усталостной прочности сварных соединений с угловыми швами на основе анализа локального напряженного состояния. *Сварка и диагностика*, **6**, 17–20.
31. Партон В.З., Перлин П.И. (1981) *Методы математической теории упругости*. Москва, Наука.
32. Рыбин Ю.И., Стаканов В.И., Костылев В.И. и др. (1982) Исследование методом конечных элементов влияния геометрических параметров швов тавровых и крестообразных сварных соединений на концентрацию напряжений. *Автоматическая сварка*, **5**, 16–20.
33. Кирьян В.И., Дворецкий В.И., Мальгин М.Г. (2012) Расчет локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций. *Там же*, **4**, 3–7.
34. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. (2015) Оценка коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах тонкостенных конструкций расчетом макро- и микроконцентрации. *Науковий вісник ХДМА*, **2** (13), 184–194.
35. Мoltасов А.В., Клочков И.Н., Кныш В.В. (2013) Инженерный метод расчета коэффициента концентрации напряжений в нахлсточном сварном соединении при растяжении и изгибе. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*, **3** (69), 150–157.
36. Goyal R., El-Zein M., Glinka G. (2016) A robust stress analysis method for fatigue life prediction of welded structures. *Welding in the World*, **60**, **2**, 299–314.
37. Moltasov A., Motrunich S. (2017) Badania lokalnego stanu naprężen w obszarze niejednorodności geometrycznej doczołowych złączy spawanych z jednostronnym nadlewem. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **4**, 64–71.

## References

1. Trufyakov, V.I., Dvoretzky, V.I., Mikheev, P.P. et al. (1990) *Strength of welded joints under alternating loads*. Ed. by V.I. Trufyakov. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Gassner, E., Haibach, E. (1968) Die Schwingfestigkeit von Schweissverbindungen aus der Sicht einer oerlichen Beanspruchungsmessung. *Fachbuchreihe Schweisstechnik*, Bd 53. Tragfaehigkeitsermittlung bei Schweissverbindungen, Dusseldorf, Verlag Schweisstechnik, 47-73 [in German].
3. Maddox, S.J. (2003) Review of fatigue design rules for welded structures. *The Paton Welding J.*, **0** **11**, 94-99.
4. Niemi, E., Fricke, W., Maddox, S.J. (2006) *Fatigue analysis of welded components: Designer's guide to the structural hot-spot stress approach*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd.
5. Hobbacher, A. (2008) *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Paris, IIF.
6. Yong Bai, Wei-Liang Jin (2015) *Marine structural design*. Oxford, Elsevier Publishing.
7. Maddox, S.J (1991) *Fatigue strength of welded structures*. Cambridge, Abington Publishing.
8. Herasymchuk, Oleg, Herasymchuk, Olena (2017) Theoretical estimation of fatigue life under regular cyclic loading. *Mechanics and Advanced Technologies*, **1**(**9** ), 49-56.
9. Neuber, H. (2001) *Kerbspannungslehre: Theorie der Spannungskonzentration Genaue Berechnung der Festigkeit*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg [in German].
10. Radaï, D., Sonsino, S.M., Fricke, W. (2006) *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd.
11. Korostylyov, L.I., Litvinenko, D.Yu. (2016) Analysis and classification of methods for estimation of strength of welded thin-walled structures of hulls. *Vestnik GUMRF Adm. S.O. Makarov*, **3**, 104-118 [in Russian].
12. Hobbacher, A.F. (2003) Effective notch stress method in comparison with other methods in fatigue design of welded structures. *The Paton Welding J.*, **0** **11**, 117-121.
13. Vorobiov, E.V., Strizhalo, V.A., Anpilogova, T.V. (2017) Strength of steels at cooling up to 4,2 K under conditions of stress concentration. *Problemy Prochnosti*, **5**, 5-10 [in Russian].
14. Navrotsky, D.I. (1968) *Design of welded structures taking into account stress concentration*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
15. Timoshenko, S.P., Goudier, J. (1975) *Theory of elasticity*. Ed. by G.S. Shapiro. Moscow, Nauka [in Russian].
16. Kopelman, L.A. (1978) *Resistivity of welded assemblies to brittle fracture*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
17. Trufyakov, V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
18. Karkhin, V.A. (1985) Influence of weld shape on stress distribution at tension of large-thickness butt joints. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 25-28 [in Russian].
19. Turmov, G.P. (1976) Determination of stress concentration factor in welded joints. *Ibid.*, **0** , 14-16 [in Russian].
20. Stakanov, V.I., Kostylyov, V.I., Rybin, Yu.I. (1987) About calculation of stress concentration factor in welded joints with butt and fillet welds. *Ibid.*, **8**, 7-18 [in Russian].
21. Karkhin, V.A., Kopelman, L.A. (1976) Stress concentration in butt joints. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 6-7 [in Russian].
22. Tkacz, P., Moltasov, A. (2017) Rozwoj metod oceny stanu naprężenia w elementach konstrukcji spawanych. Czesc 1: Metody tradycyjne. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **4**, 52-56 [in Polish].
23. Makhnenko, V.I., Mosenkis, R.Yu. (1985) Calculation of stress concentration factors in welded joints with butt and fillet welds. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 7-18 [in Russian].
24. Tsumarev, Yu.A. (2010) Influence of asymmetry of one-side butt welds on distribution of stresses in welded joint. *Svarka i Diagnostika*, **5**, 24-27 [in Russian].

25. Tsumarev, Yu.A. (2010) Influence of eccentric tension on stress state of butt welded joint. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 6-10 [in Russian].
26. Ermolaev, G.V., Martynenko, V.A., Marunich, I.V. (2014) Effect of weld convexity sizes on stress state of butt joint during tension. *The Paton Welding J.*, **8**, 26-32.
27. Gurney, T.R. (1979) *Fatigue of welded structures*. 2nd Ed. London, New York, Melbourne, Cambridge University Press.
28. Asnis, A.E., Ivashchenko, G.A., Anderson, Ya.E. (1982) Effect of weld to base metal transition radius on fatigue resistance of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 48-51 [in Russian].
29. Karkhin, V.A., Kostylyov, V.I., Stakanov, V.I. (1988) Effect of geometric parameters of butt, tee and cruciform joints on stress concentration factor. *Ibid.*, **3**, 6-11 [in Russian].
30. Lukianov, V.F., Parkhomenko, A.A., Rogozin, D.V. (2010) Evaluation of fatigue strength of welded joints with fillet welds on the base of analysis of local stress state. *Svarka i Diagnostika*, **6**, 17-20 [in Russian].
31. Parton, V.Z., Perlin, P.I. (1981) *Methods of mathematical theory of elasticity*. Moscow, Nauka [in Russian].
32. Rybin, Yu.I., Stakanov, V.I., Kostylyov, V.I. et al. (1982) Study by finite element method of effect of geometric parameters of tee and cruciform welded joints on stress concentration. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 16-20 [in Russian].
33. Kirian, V.I., Dvoretzky, V.I., Malgin, M.G. (2012) Calculation of local stresses in zones of welded joints of large-sized space structures. *The Paton Welding J.*, **4**, 2-5.
34. Korostylyov, L.I., Litvinenko, D.Yu. (2015) Evaluation of stress concentration factor in welded assemblies of thin-walled structures by calculation of macro- and microconcentration. *Naukovyj Visnyk KhDMA*, **2(3)**, 184-194 [in Russian].
35. Moltasov, A.V., Klochkov, I.N., Knysh, V.V. (2013) Engineering approach of calculation of stress concentration factor in overlap welded joint at tension and bending. *Visnyk NTUU KPI. Seriya Mashynobuduvannya*, **3(9)**, 150-157 [in Russian].
36. Goyal, R., El-Zein, M., Glinka, G. (2016) A robust stress analysis method for fatigue life prediction of welded structures. *Welding in the World*, **60(2)**, 299-314.
37. Moltasov, A., Motrunich, S. (2017) Badania lokalnego stanu w obszarze niejednorodnosci geometrycznej doczolowych zlaczy spawanych z jednostronnym nadlewem. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **4**, 64-71 [in Polish].

## КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ОДНОСТОРОННИМ УСИЛЕНИЕМ (Обзор)

А.В. Молтасов, П.Н. Ткач, И.Г. Ткач, В.В. Верушкин

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, м. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Прочность деталей и элементов конструкций при наличии сварных швов в значительной мере зависит от конструктивного оформления их соединений и узлов, резкое изменение геометрической формы в их окрестности обуславливает появление дополнительных местных напряжений или их концентрацию. Величина этих напряжений зависит от конструктивной формы сопряжения отдельных элементов, поэтому они по-разному могут влиять на прочность сварных конструкций. Концентрация напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу существенно влияет на сопротивление усталости сварных соединений. При упругом деформировании количественной мерой концентрации напряжений служит теоретический коэффициент концентрации напряжений, который не зависит от свойств материала, а при заданном виде деформации на его величину влияют только геометрические параметры концентратора напряжений, такие как его форма и относительные размеры. На практике теоретический коэффициент концентрации напряжений определяется по приближенным зависимостям, а также при помощи аналитических, экспериментальных и численных методов исследования напряженного состояния. Описание и анализ указанных методов является целью представленного обзора. Библиогр. 37, рис. 2.

*Ключевые слова:* стыковое сварное соединение, одностороннее усиление, осевая нагрузка, напряжённое состояние, растяжение, изгиб, концентрация напряжений

## STRESS CONCENTRATION IN THE BUTT WELDED JOINTS WITH A ONE-SIDED REINFORCEMENT (Review)

A.V. Moltasov, P.M. Tkach, I.G. Tkach, V.V. Verushkin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

The strength of parts and structural elements in the presence of welds largely depends on the design of their joints and assemblies. A sharp change in the geometric shape in their vicinity causes the appearance of additional local stresses or their concentration. The value of these stresses depends on the structural shape of mating of separate elements. That is why they can affect the strength of welded structures in a different way. Stress concentration of in the zone of transition from the weld to the base metal has a significant effect on the resistance of fatigue welds. At the elastic deformation, as a quantitative level of stress concentration, the theoretical stress concentration factor serves, which does not depend on properties of the material, and at a preset type of deformation its value is influenced only by geometric parameters of the stress concentrator, such as its shape and relative dimensions. In practice, the theoretical stress concentration factor is determined by approximate dependencies, as well as by analytical, experimental and numerical methods for investigation of stressed state. The description and analysis of these methods are the aim of the presented review. 37 Ref., 2 Fig.

*Keywords:* butt welded joint, one-sided reinforcement, axial load, stressed state, tension, bending, stress concentration

Поступила в редакцию 22.01.2019