

УДК 539.4

Вячеслав Дегтярев, к.т.н., с.н.с.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦЬ ВИТРИВАЛОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ МІЦНОСТІ З ЗАЛИШКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Анотація. Запропоновано методику, яка дозволила на прикладі аналізу діаграм граничних напружень циклу зварних з'єднань сталей Ст.3сп, 09Г2С та 14ХМНДФР показати, що в досліджуваному діапазоні середніх напружень циклу та усталених залишкових напружень зварні з'єднання більшої міцності мають вищі значення границі витривалості, яка інтенсивніше зростає зі збільшенням відносних значень середнього напруження циклу.

Ключові слова: зварне з'єднання, границя витривалості, усталене залишкове напруження, середнє напруження циклу, середня амплітуда циклу.

Viacheslav Dehtiarev, Ph.D.

THE METHOD OF DEDERMINING THE ENDURANCE LIMITS OF WELDET JOINTS OF STEEL OF DIFFERENT STRENGTHS WITH RESIDUAL STRESSES

Abstract. A methodology was proposed that made it possible to establish that in the studied range of average cycle stresses and stable residual stresses, welded joints of greater strength have higher values of the endurance limit.

Keywords: welded joint, endurance limit, stable residual stress, average cycle stress.

Раніше встановлено, що діаграма граничних напружень циклу (ДГНЦ) стикового з'єднання сталі більшої міцності з високими залишковими напруженнями (ЗН) розтягу після їх поєднання в суміщеному вигляді є продовженням діаграми менш міцного з'єднання. Подання результатів досліджень у вигляді суміщених діаграм дозволило визначити галузі раціонального використання сталей різної міцності. Оскільки вихідні ЗН зростають пропорційно границі плинності основного матеріалу σ_T , то, незважаючи на однакові одержувані значення границь витривалості σ_R до певного рівня значень коефіцієнта асиметрії циклу $R\sigma$, у зварних з'єднаннях сталей більшої міцності значення усталених залишкових напружень $\sigma_{ост}^y$ також будуть більшими. Враховуючи те, що величина $\sigma_{ост}^y$ за інших рівних умов відіграє основну роль у зниженні опору втомі, порівнювати результати випробувань зварних з'єднань сталей, що містять різний рівень $\sigma_{ост}^y$, не цілком обґрунтовано. Крім цього, не враховується той факт, що однакові границі витривалості зварних з'єднань різної міцності отримують при неоднаковому відношенні середнього напруження циклу σ_m до границі плинності матеріалу.

У зв'язку з цим були проведені дослідження, які дозволили зіставити опір втомі зварних з'єднань сталей різного рівня міцності, що містять однаковий рівень граничних усталених залишкових напружень, в діапазоні зміни $R\sigma$, при якому, як зазначалося, спостерігався збіг діаграм.

Аналіз проведено на прикладі випробувань стикових зварних з'єднань низьковуглецевої Ст.3сп ($\sigma_T = 300$ МПа), низьколегованої 09Г2С ($\sigma_T = 340$ МПа) та низьколегованої високоміцної 14ХМНДФР ($\sigma_T = 600$ МПа) сталей. Максимальні вихідні ЗН склали, залежно від рівня міцності сталі, 0,75-0,85 від σ_T та відповідають

260, 290 та 450 МПа у зварних з'єднаннях сталей Ст.3сп, 09Г2С та 14ХНДМФР відповідно.

Раніше отримані результати втомних випробувань стикових зварних з'єднань вищезгаданих сталей з високими ЗН показали, що в діапазоні зміни $R\sigma$ від -1 до 0,6 границі витривалості збігаються. Оскільки похила частина діаграм паралельна лінії проведеної під кутом 45, це вказує на те, що гранична амплітуда не залежить від середнього напруження циклу. Це означає, що по-перше, при однакових значеннях σ_R в зварних з'єднаннях сталей різної міцності значення σ_{ocm}^y будуть різними, по-друге, незважаючи на однакові величини граничних напружень їх відношення до границі плинності матеріалу досліджуваних сталей буде різним.

У зв'язку з цим, якщо представити ДГНЦ зварних з'єднань у відносних координатах, можна побачити (Рис. 1), що вже спочатку при однакових відносних значеннях середніх напружень σ_m/σ_T вони розходяться. При цьому сталі більшої міцності мають більш високі відносні значення границі витривалості, змінюючи кут нахилу діаграми у вигляді прямих більшою мірою. Подання даних у такому вигляді дозволяє, враховуючи механічні властивості досліджуваних сталей, аналізувати отримані результати у порівняних умовах випробувань. У загальному вигляді рівняння для кожної прямої можна записати як

$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_{-1}} = 1 + \kappa \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right).$$

де $\sigma_{-1} = 60$ Мпа - границя витривалості зварного стикового з'єднання з залишковими напруженнями при симетричному циклі навантаження, $\kappa = \sigma_{Ti}/\sigma_{-1}$ - кут нахилу прямих.

Це дає можливість визначення ДГНЦ зварних з'єднань досліджуваних сталей, знаючи рівняння однієї з них.

В якості прикладу у таблиці наведено розрахункові значення границь витривалості зварних з'єднань досліджуваних сталей при різних значеннях σ_m/σ_T . Аналіз табличних даних показав, що при однаковому відношенні σ_m/σ_T , тобто при випробуваннях у порівняних умовах, у міру підвищення міцності сталі границя витривалості збільшується. Причому зі збільшенням цього відношення різниця між границями витривалості зростає.

Таблиця. Границі витривалості зварних з'єднань досліджуваних сталей.

Сталь	Границі витривалості σ_R , МПа при різних σ_m/σ_T				
	0	0,1	0,3	0,5	0,7
Ст.3сп	60	90	150	210	270
09Г2С	60	94	162	230	298
14ХНДМФР	60	120	240	360	480

Відомо, що зі зростанням середнього напруження циклу за умови досягнення максимальних напружень (з урахуванням залишкових) границі плинності матеріалу відбувається зниження вихідних ЗН до рівня усталених. Враховуючі проведені раніше дослідження, які дозволили визначити діаграми граничних напружень циклу або граничних амплітуд циклу зварних з'єднань з різною величиною σ_{ocm}^y , а також використовуючи результати випробувань зварних з'єднань без ЗН, можна визначити граничні напруження зварних з'єднань досліджуваних сталей при однаковому рівні

σ_{ocm}^y . Враховуючи експериментальні та розрахункові дані, чутливість стикових зварних з'єднань до σ_{ocm}^y представлялась у вигляді залежності між відношенням граничної амплітуди циклу до відповідної границі витривалості та величиною граничних усталених залишкових напружень. В даному випадку розглядалися найцікавіші характеристики - мінімальна гранична амплітуда σ_a^y та відповідне їй граничне напруження циклу, при яких реалізується єдиний граничний цикл напружень. З аналізу результатів слід, що в з'єднаннях сталей з більш високими механічними властивостями однакові значення σ_a^y/σ_R досягаються при більш високих значеннях σ_{ocm}^y . Ця різниця зростає у міру підвищення σ_a^y/σ_R . Наприклад, $\sigma_a^y/\sigma_R = 0,5$, що відповідає $R\sigma = 0$, в з'єднаннях сталей Ст.3сп і 14ХМНДФР можна отримати при σ_{ocm}^y , рівних 170 і 440 МПа відповідно.

Користуючись отриманими даними, неважко встановити залежності границь витривалості зварних з'єднань досліджуваних сталей від граничних усталених залишкових напружень за умови, що зварні з'єднання сталей різної міцності мають однакову мінімальну граничну амплітуду циклу від зовнішнього навантаження, яка дорівнює 60 МПа. Аналіз представлених результатів дозволив зіставити границі витривалості зварних з'єднань низьковуглецевої і низьколегованих сталей різної міцності, що містять однакові значення σ_{ocm}^y (Рис. 2). З підвищенням усталених залишкових напружень вони зменшуються для досліджуваних зварних з'єднань. Однак границі витривалості зварних з'єднань сталей з більш високими механічними властивостями залишаються завжди вищими у всьому дослідженому діапазоні зміни σ_{ocm}^y . Наприклад, при зміні σ_{ocm}^y від 50 МПа до 200 МПа границя витривалості зварного з'єднання низьколегованої високоміцної сталі в порівнянні з низьковуглецевою вище в 2,2 та 4 рази відповідно. Якщо при σ_{ocm}^y , рівному 200 МПа, зниження границі витривалості зварного з'єднання низьковуглецевої сталі відбувається в 3 рази, то для зварного з'єднання високоміцної сталі тільки в 1,5 рази.

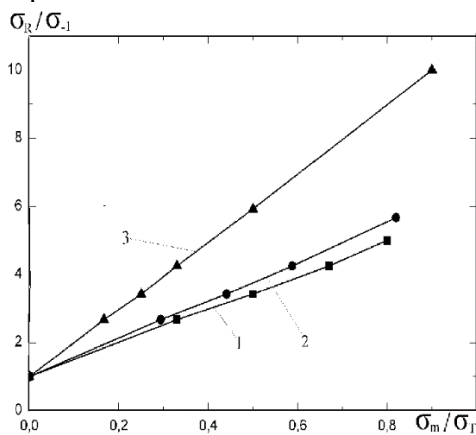


Рис.1. Залежності між відносними значеннями границь витривалості зварних з'єднань сталей Ст.3сп (1), 09Г2С (2), 14ХМНДФР (3) та середніх напружень циклу.

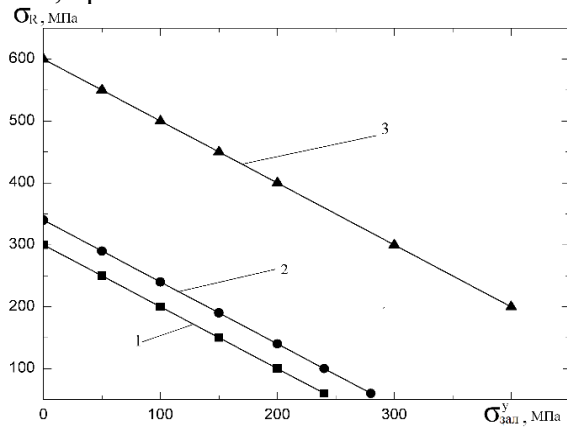


Рис.2. Залежність границь витривалості стикових з'єднань сталей Ст.3сп (1), 09Г2С (2) та 14ХМНДФР (3) від граничних усталених залишкових напружень.

Таким чином, отримані дані дозволили зіставити граничні напруження в зварних з'єднаннях, враховуючи їх механічні властивості і рівень усталених залишкових напружень, що може допомогти у виборі сталі при відомій величині напружень від зовнішнього навантаження.