

Робота виконана за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень, реєстраційний номер 0107U004213.

Література

1. Конева Н.А., Тришкина Л.И., Козлов Э.В. Эволюция структуры и зарождение разрушения // Современные вопросы физики и механики материалов. Ред. З.П. Каменцева. – С.-Петербург: СПбГУ, 1997. –С.322-332.
2. Byun T.S., Lee E.H., Hunn J.D. Plastic deformation in 316LN stainless steel – characterization of deformation microstructures // Journal of Nuclear Materials.-2003.-Vol. 321.-P. 29–39.
3. Han B.Q., Lavernia E.J., Mohamed F.A. Dislocation structure and deformation in iron processed by equal-channel-angular pressing // Metallurgical and Materials Transactions A.-2004.- Vol. 35A (4).-P. 1343-1350.
4. Природа усталости металлов. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. М., «Металлургия», 1975.-456 с.
5. Effect of hot deformation on phase transformation kinetics of 86CrMoV7 steel / Xiao F., Liao B., Qiao G., Guan S. // Materials Characterization.-2006.-Vol. 57.-P. 306–313.
6. Игнатович С.Р. К вопросу о статистической природе пластического деформирования // Проблемы прочности.-1996.-№4.-С. 99-108.
7. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. - М.: Metallurgy, 1983.– 232 с.
8. Hutchinson B., Ridley N. On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel // Scripta Materialia.-2006.-Vol. 55.-P. 299–302.
9. Multiscale modelling of the plastic anisotropy and deformation texture of polycrystalline materials / Paul Van Houtte, Anand Krishna Kanjarla, Albert Van Bael // European Journal of Mechanics A/Solids.-2006.- Vol. 25.-P. 634–648.
10. Лебедев А.А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Проблемы прочности, 2002.- № 4.-С 5-11.

Одержано 25.06.2007 р.

УДК 539.3; 537.39

Г.Степанов, докт. техн. наук; А.Бабуцький, канд. техн. наук; І.Мамєєв

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАНУ, Київ, Україна

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА РЕЛАКСАЦІЮ ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ

Наведено результати експериментальних досліджень релаксації залишкових зварювальних напружень під дією імпульсного електричного струму (ІЕС) високої густини та попереднього нагрівання. Оцінку зміни напружено-деформованого стану зразків проводили тензометруванням. Припускаючи, що дія ІЕС на релаксацію залишкових зварювальних напружень аналогічна високотемпературному відпуску, методом чисельного моделювання досліджували кінетику їх формування та релаксації у кільцевих зразках, що використовувалися в експериментах.

G.Stepanov, A.Babutsky, I.Mameyev

INFLUENCE OF IMPULSE ELECTRIC CURRENT ON RELAXATION OF RESIDUAL WELDING STRESSES

The results of the experimental investigations of residual welding stress relaxation under action of high-density impulse electric current and preliminary heating are presented. Tensometry was used for estimation of the specimens strain-stress state. Taking into account the analogy between impulse electric current treatment and high temperature tempering the forming and relaxation of the residual welding stresses in ring specimens used in the tests was investigated numerically.

Вплив залишкових зварювальних напружень (ЗЗН) на несучу здатність конструкцій як при статичному, так і при циклічному навантаженні загальновідомий. При цьому зазвичай розглядають три аспекти впливу ЗЗН [1]: додавання цих

напружень до напружень від зовнішніх навантажень, підвищення об'ємності напруженого стану і їхній вплив на стійкість до розповсюдження тріщини. Якщо дані про вплив ЗЗН на статичну міцність при нормальних температурах досить суперечливі [2], то в умовах циклічного навантаження, особливо при навантаженні з малим рівнем напружень, вплив ЗЗН однозначний і проявляється в істотному зниженні границі витривалості матеріалу зварного з'єднання та підвищенні швидкості розвитку тріщини втоми [3, 4]. Розтягуючі ЗЗН також є визначальною причиною корозійного розтріскування - крихкого руйнування металу при одночасній дії корозійно-активного середовища та механічних напружень [2].

Операції зі зниження ЗЗН в конструкціях як правило важко виконувати, вони вимагають значних витрат і в основному зводяться до теплового, силового (механічного) впливу на метал зварного з'єднання або до комбінації цих факторів. Силовий вплив на зварне з'єднання здійснюється його розтягом, прокаткою роликками, вібраційною або вибуховою обробками; тепловий вплив зазвичай включає термообробку, термофіксацію та термічне правлення зварного з'єднання [1]. Кожний з цих методів не позбавлений недоліків. Прикладом може бути найпоширеніший метод, заснований на термообробці - загальному високому відпуску деталі або елемента конструкції: високий відпуск може приводити до зниження опору руйнуванню втоми та крихкому руйнуванню металу шва і зони термічного впливу, руйнуванню з'єднання з різнорідних матеріалів [2]. Застосування високого відпуску може також супроводжуватися утворенням нових напружень, які особливо помітні у випадках обробки масштабних конструкцій, де загальний відпуск всієї конструкції замінюється місцевим відпуском певних її ділянок, наприклад, ділянок кільцевих швів на трубопроводах та інших конструкціях. У цьому випадку локальна високотемпературна обробка може призводити до формування в конструкції після її повного охолодження ділянок з високою залишковою напруженістю (див. наприклад, [5]), оскільки така обробка, по суті, відтворює термічний цикл зварювання. Таким чином, розробка нових методів зниження розтягуючих ЗЗН, що позбавлені недоліків, властивих існуючим методам, є актуальною задачею.

В літературі відомі дані з вивчення дії ІЕС на матеріал зварних швів зразків з алюмінієвого сплаву АМг6 [6], за результатами яких зроблено висновок про те, що міцність металу в зоні біля шва підвищується до міцності вихідного матеріалу. Дані про дослідження впливу ІЕС на релаксацію ЗЗН практично відсутні, хоча результати вивчення впливу імпульсного струму на релаксацію напружень при механічних випробуваннях представлені досить широко (див., наприклад, [7]).

У даній роботі наведено результати експериментальної оцінки впливу ІЕС на релаксацію залишкових зварювальних напружень, а також впливу на цей процес попереднього помірного нагрівання. Методом скінченних елементів (МСЕ) виконано моделювання кінетики напружено-деформованого стану (НДС) при зварюванні та наступному високотемпературному нагріванні (відпуску) в кільцевих зразках, що використовувалися в експериментах, виходячи з припущення, що дія ІЕС на релаксацію ЗЗН аналогічна дії високої температури.

Методика та результати експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження виконували на кільцевих зразках зі сталі Ст3 шириною 15 мм, нарізаних з труби з внутрішнім діаметром 50 мм і товщиною стінки 5 мм. Зварний шов на кожному зразку виконували шляхом заварки за один прохід кільцевої V-подібної виточки (кут при вершині симетричної виточки - 90° , глибина - 4 мм), нанесеної в центральній частині зразка. Використовували електродугове зварювання в середовищі аргону при струмі близько 60 А, матеріал зварювального дроту - сталь Н10Т. Після виконання шва зразки проточували по зовнішній поверхні для зняття зварювального валика, потім наклеювали тензодатчики: один уздовж зварного шва, другий - паралельно, на краю зразка. Опис схеми генератора ІЕС, до якого приєднували зразок, а також системи

реєстрації параметрів імпульсу струму наведено в роботі [8]. Для всіх зразків використовували один режим струму з максимальною амплітудою 120 кА в першому напівперіоді розряду, який витримували, заряджаючи батарею конденсаторів ємністю 600 мкФ до одного й того ж рівня напруги - 5 кВ.

На рис.1 наведено схему експериментального складання, яку приєднували до шин генератора ІЕС і безпосередньо перед пропусканням імпульсу струму стягували вздовж осі зразка струбциною (на рисунку не показана). Для вивчення впливу попереднього нагрівання зразка на процес релаксації ЗЗН в порожнину зразка встановлювали нагрівальний елемент у вигляді спіралі з ніхромового дроту, а зовні теплоізолювали. Температуру нагрівання контролювали з використанням приладу КСП-4 двома термопарами: одну з них приварювали на внутрішній поверхні зразка безпосередньо біля нагрівального елемента, іншу - на зовнішній кромці зразка.

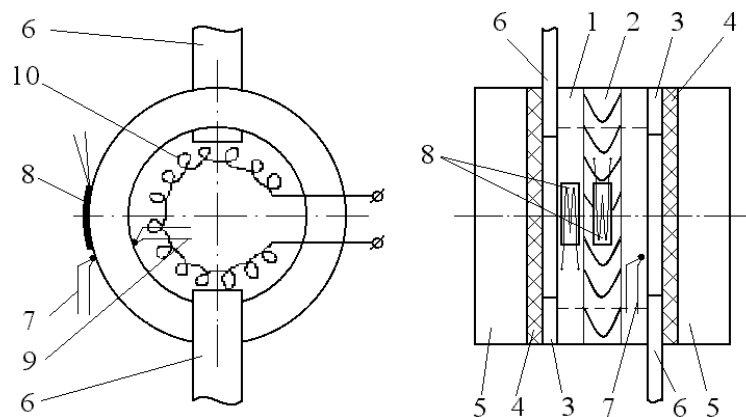


Рисунок 1 - Схема експериментального складання: 1 – зразок; 2 - зварний шов; 3 – компенсуючі підкладки; 4 – термо-електроізолятори; 5 – сталеві шайби; 6 – шини генератора імпульсного струму; 7 – зовнішня термопара; 8 – тензодатчики; 9 – внутрішня термопара; 10 – нагрівальний елемент

Результат впливу ІЕС на релаксацію напружень оцінювали за зміною окружної деформації зовнішньої поверхні зразка, тобто за різницею показань цифрового вимірювача деформацій ИДЦ-1, що приєднувався до тензодатчиків: до того, як пропускали імпульс струму, та після кожного імпульсу (показання приладу зчитували за відсутності осьового навантаження зборки). При цьому кожний раз після дії струму (до зчитування даних про деформацію) зразок охолоджували потоком повітря до початкової кімнатної температури.

Через зразок пропускали імпульси струму в наступній послідовності: три імпульси при кімнатній температурі, три імпульси при температурі зразка 110 °С та два імпульси при температурі 130 °С (на стадії нагрівання температуру контролювали з боку внутрішньої поверхні зразка: по досягненні температури 150 °С у першому випадку й 180 °С у другому нагрівання припиняли, після чого давали витримку для вирівнювання температури за зразком, яку оцінювали за даними показань обох термопар; в результаті витримки однорідна температура зразка встановлювалася на рівні 110 °С і 130 °С відповідно). Відзначимо, що виміри показали приріст температури в результаті впливу ІЕС (без додаткового нагрівання) на 10...12 °С, крім того, нагрівання до зазначених температур 110...190 °С без дії ІЕС ніяких змін у показаннях тензодатчиків не викликало.

Результати експериментів за даними випробувань чотирьох зразків наведено на рис. 2. З аналізу результатів випливає, що при кімнатній температурі дія ІЕС практично

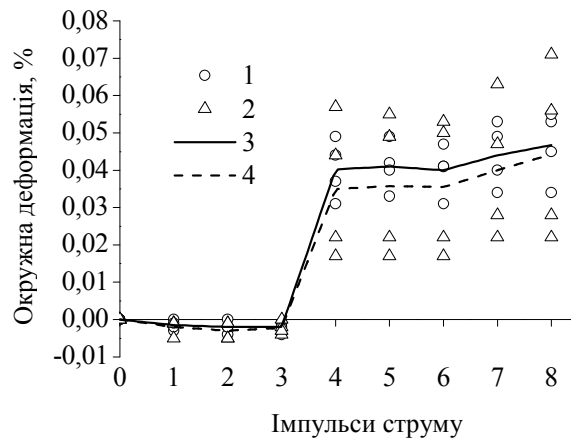


Рисунок 2 - Вплив ІЕС на деформацію кільцевого зразка: 1, 3 – дані тензодатчиків, встановлених вздовж осі зварного шва; 2, 4 - дані тензодатчиків, встановлених біля краю зразка (див. рис.1)

не викликає деформацій матеріалу зразка. Після обробки ІЕС попередньо нагрітих зразків тензодатчиками фіксується збільшення діаметра зразка (його деформація) на 0,02...0,06 %.

Для інтерпретації отриманих експериментальних результатів з впливу ІЕС на напружений стан зразка нижче наведено результати моделювання МСЕ кінетики НДС при зварюванні та наступному високотемпературному нагріванні (відпуску), виходячи з припущення, що дія ІЕС на релаксацію ЗЗН аналогічна дії високої температури.

Чисельне моделювання кінетики НДС і релаксації ЗЗН при зварюванні та послідовному нагріванні до високих температур. Кінетику НДС у кільцевому зразку при зварюванні та подальшому високотемпературному нагріванні для зняття ЗЗН обчислювали з використанням методу скінченних елементів [9, 10] розв'язуванням задачі в нестационарній термо-пружно-пластичній постановці, використовуючи програмний комплекс ANSYS-ED.

На рис.3 наведена скінченноелементна модель кільцевого зразка, що використовувалася при чисельному моделюванні даної осесиметричної задачі. Геометричні розміри моделі відповідали використаним в експерименті, при цьому розглядали половинку кільця, симетричну щодо осі зварного шва, замінюючи дію відкинутої частини граничною умовою $u_z = 0$ (рис. 3).

Розрахунки виконували для спрощеної моделі поведінки матеріалу, згідно якої непружне деформування матеріалу визначається рівнянням ізотропного деформаційного зміцнення з урахуванням впливу температури у вигляді:

$$\sigma = \sigma_Y (1 + \varepsilon) \left(1 - \frac{T}{T^*}\right),$$

де σ_Y – границя текучості, T – температура нагрівання, T^* - параметр рівняння. У розрахунках приймали $\sigma_Y = 400$ МПа при температурі 0 °С, $\sigma = 40$ МПа при $T = 1000$ °С, що забезпечується при $T^* = 1110$ °С.

Фізико-механічні властивості матеріалу кільця і зварного шва приймали ідентичними, при цьому з ростом температури від 0 °С до 1000 °С значення модуля Юнга E та густини ρ змінюються за лінійним законом з $2 \cdot 10^{11}$ Па до $1 \cdot 10^{11}$ Па та з 7800 кг/м³ до 7700 кг/м³ відповідно. Інші властивості матеріалу в розрахунках приймали постійними: коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$; коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/°С; питома теплоємність $C_V = 450$ Дж/(м³К), питома теплопровідність $\eta = 40$ Дж/(м·с·К).

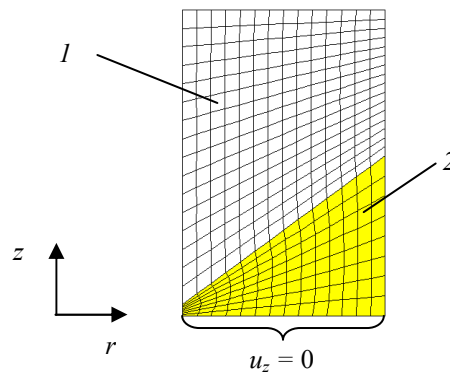


Рисунок 3 - Скінченноелементна модель кільцевого зразка, що використовувалась у розрахунках (z – вісь кільцевого зразка)

На першій стадії розрахунків у кільцевому зразку оцінювали НДС, що формується при охолодженні зварного шва, тобто визначали залишкові зварювальні напруження. НДС розраховували для нульових початкових напружень. У кільці розглядали два об'єми матеріалу (рис. 3): 1 – матеріал кільця, 2 – матеріал зварного шва. Приймали, що в початковий момент температура матеріалу кільця становила $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура матеріалу зварного шва становила $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далі вирішували задачу охолодження кільця при конвективному теплообміні з навколишнім середовищем. Теплообмін через зовнішні поверхні характеризували коефіцієнтом конвективного обміну $k = 20\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ при температурі навколишнього середовища $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Час охолодження всього зразка до температури близької $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ становив 1000 с .

На другій стадії розрахунків оцінювали вплив нагрівання до температур $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, ..., $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ на релаксацію ЗЗН, попередньо сформованих при охолодженні зразка після зварювання. Виходячи з використаної при розрахунках спрощеної моделі матеріалу, вплив швидкості нагрівання та охолодження не враховувався. В цих розрахунках початковими умовами були залишкові напруження та деформації, що виникли після зварювання (розрахованих на першій стадії моделювання). За результатами моделювання нагрівання до відповідної температури та послідуного охолодження до початкової температури, що імітує операцію термічного відпуску до цієї температури, в точках, що відповідають місцям наклейки тензодатчиків, оцінювали величину зміни сумарної (пружної та пластичної) окружної деформації, яка виникає в зразку внаслідок даної термообробки (цю ж деформацію реєстрували тензодатчиками в експерименті). На рис. 4 наведені розрахункові значення вказаної деформації в залежності від температури нагрівання.

Таким чином, із результатів проведеного моделювання кінетики НДС при виконанні зварного шва (перша стадія розрахунків) та наступного нагрівання до високих температур (друга стадія розрахунків) випливає, що окружні деформації в області зварного шва, які відповідають отриманим в експерименті, можуть бути досягнуті при високих температурах нагрівання (близько $900\text{ }^{\circ}\text{C}$). В якості приклада на рис. 5 наведено розподіли розрахункових ЗЗН, що формуються зразу після зварювання (криві 1, 2) та наступного високотемпературного нагрівання до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (криві 3, 4). З їх аналізу можна зробити висновок про значне зниження напруженості в області зварного шва.

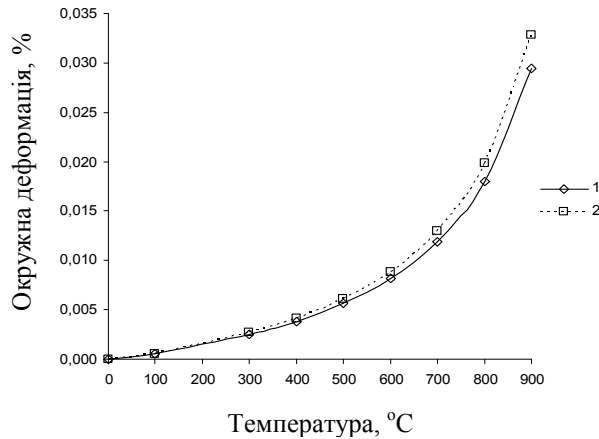


Рисунок 4 - Розрахункові залежності значень сумарної (пружної та пластичної) окружної деформації в кільцевому зразку в місцях наклепки тензодатчиків: 1 – точка на осі шва; 2 – точка, що відповідає середині ширини тензодатчика, встановленого на краю зразка

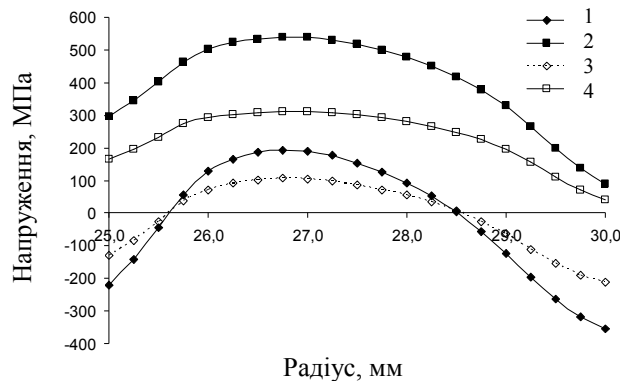


Рисунок 5 - Розподіл осьових (1, 3) та окружних (2, 4) напружень в зразку по його товщині (суцільні лінії – після зварювання, штрихові – після відпуску)

Висновки. Запропоновано методику експериментальних досліджень, що може бути використана для оцінки впливу імпульсного електричного струму і попереднього нагрівання на релаксацію залишкових зварювальних напружень.

Припущення про аналогію між впливом імпульсного електричного струму на релаксацію залишкових зварювальних напружень та дією високої температури дозволяє оцінити вплив імпульсного струму на зміни НДС в зразку.

За результатами експериментів і чисельного моделювання дія імпульсного електричного струму за умов попереднього помірною нагрівання зразка суттєво знижує рівень залишкових зварювальних напружень.

Задачею подальших досліджень є оцінка впливу імпульсного електричного струму на залишкові зварювальні напруження в елементах конструкцій.

Література

1. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. - К.: Вища школа, Головное изд-во, 1987. - 246 с.
2. Петушков В.Г., Кудинов В.М., Фадеев Ю.И. Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций. - М.: Металлургия, 1993. - 160 с.
3. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений. - К.: Наукова думка, 1973. – 216 с.
4. Труфяков В.И., Михеев П.П., Кузьменко А.З. Влияние масштабного фактора и остаточных сварочных напряжений на скорость распространения усталостных трещин // Пробл. прочности. – 1980. - №6. – С.20-22, 30.

5. Степанов Г., Бабуцький А. Вплив локального осесиметричного нагрівання труби на рівень залишкових напружень // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – Т.9. – №4. – С.32-36.
6. Попов О.В., Власенков С.В. и др. Электроимпульсное упрочнение околошовной зоны сварных швов // Сб. тезисов докл. III школы-семинара «Физика и технология электромагнитных воздействий на структуру и механические свойства кристаллов». – Воронеж: РИО Воронежского областного управления НТО машиностроителей, 1992.
7. Спицин В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
8. Степанов Г.В., Бабуцький А.И., Мамеев И.А. Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // Пробл. прочности. – 2004. – №4. – С. 60-67.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
10. Сахаров А.С., Альтенбах И. Метод конечных элементов в механике твердых тел. – Киев: Вища школа, 1982. – 478 с.

Одержано 15.09.2006 р.

УДК 539.3

Л.Роп'як¹, канд. техн. наук; І.Шуляр¹; І.Шацький², канд. фіз.–мат. наук

¹*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

²*Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України*

ПРО ЗГИН ПЛАСТИНКИ НА НЕОДНОРІДНІЙ ВІНКЛЕРІВСЬКІЙ ОСНОВІ

Розглядається задача згину пластинки на неоднорідній вглиб вінклерівській основі. Досліджено вплив армування основи на несучу здатність оксидного покриття під локальним навантаженням.

L.Ropiak, I.Shuliar, I.Shatsky

ABOUT BENDING OF PLATE ON INHOMOGENEOUS VINKLER FOUNDATION

The problem of the local bending of a plate on inhomogeneous deep into foundation is considered. The influence of the substrate sheathing on a carrying capacity of a covering in the local loading has been investigated.

Умовні позначення

- x, y, z – декартові координати;
- w – прогин пластинки;
- σ – контактне напруження;
- D, E_n, ν_n – циліндрична жорсткість та пружні сталі покриття;
- k – коефіцієнт жорсткості основи;
- σ_{\max} – максимальне напруження в покритті;
- h, H – товщина покриття та підкладки;
- H_c – товщина композитного шару;
- E_m, E_f – жорсткості матриці та арматури;
- χ – концентрація арматури.

Сучасний стан розвитку техніки вимагає використання матеріалів з високими фізико-механічними властивостями. Традиційні конструкційні матеріали не можуть в