

Використання обробки імпульсним електричним струмом для зниження схильності до крихкого руйнування маловуглецевої сталі

Г. В. Степанов, доктор технічних наук, професор

Г. В. Чижик

А. І. Бабуцький, кандидат технічних наук

А. І. Позднякова*

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ

*Ліпецький державний технічний університет, Ліпецьк

Досліджено вплив обробки імпульсним електричним струмом на структурний і фазовий склад маловуглецевої сталі Ст3. Відзначено, що даний вид обробки призводить до зсуву температурного інтервалу в 'язко-крихкого переходу сталі в бік більш низьких температур.

Актуальним завданням є розробка технологій, що дозволяють підвищувати опір матеріалу елементів конструкцій крихкому руйнуванню в місцях складно-напруженого стану. Причиною крихкості поряд з багатьма факторами (неоднорідність структури, геометрія конструкції, порушення технології виготовлення) є наявність залишкових напружень і неоднорідний розподіл їх в матеріалі. Для зниження крихкості і залишкових напружень часто використовують методи, засновані на термічній обробці всієї конструкції або її частини. Однак подібні методи можуть призводити до появи в матеріалі при охолодженні нових напружень. Тому доцільно проводити пошук і реалізацію новітніх технологій з метою підвищення опору крихкому руйнуванню матеріалів і, як наслідок, розширення технологічних сфер їх експлуатації, а також збільшення робочого ресурсу обладнання та елементів конструкцій.

Обробка імпульсним електричним струмом (ІЕС) високої щільності має позитивний вплив на характеристики міцності і пластичності [1 – 3]. У роботах [4 – 5] описано застосування даної обробки для зниження залишкових напружень в покриттях, деталях після шліфування, у зварювальних швах тощо.

Метою даної роботи є встановлення впливу обробки ІЕС високої щільності на характеристики крихкості маловуглецевої сталі Ст3 при кімнатній температурі та оцінка її гомогенізуючої дії в порівнянні з відпалом.

При виконанні експерименту використовували генератор ІЕС, який включав джерело високої напруги (до 5 кВ), батарею конденсаторів, загальною ємністю до 2000 мкФ, механічний розрядник і баластний резистор. Зразки зі

сталі розміщували в жорсткій діелектричній обоймі для запобігання їх можливої деформації, після чого через них пропускали у поздовжньому напрямку по три імпульси струму з максимальною густиною $j = 1,2 \text{ кА/мм}^2$. Імпульс струму, що має вигляд згасаючої синусоїди, в схемі розряду реєстрували за допомогою поясу Роговського, сигнал з якого передавався на високошвидкісну аналого-цифрову плату реєстрації персонального комп'ютера [5].

Випробування сталі Ст3 на ударний триточковий згин (ударну в'язкість) виконували на маятниковому копрі КМ-30, на стандартних зразках [6] при швидкості навантаження 5 м/с в діапазоні температур $T = 0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Використовували зразки в стані поставки і після відпалу при температурі $870 \text{ }^\circ\text{C}$, а також після обробки ІЕС високої густини при кімнатній температурі.

Для вивчення поверхонь зламів і мікромеханізмів руйнування ударних зразків використовували електронний скануючий мікроскоп Jeol-840. Додаткові дослідження зразків методами металографії та рентгенівської дифракції виконували на світловому мікроскопі Axiovert 40MAT та дифрактометрі ДРОН-3М з автоматичною текстурною приставкою.

Результати випробувань зразків на ударний згин та характерні діаграми залежності ударної в'язкості від температури наведено на рис. 1. Встановлення характеристик переходу матеріалу з в'язкого в крихкий стан температурний інтервал крихкості оцінювали за енергією руйнування та за співвідношенням кристалічної і волокнистої складової в зламі. Цей інтервал обмежується двома граничними температурами. Верхня границя – вище якої зразки руйнуються в'язко. Їм відповідає значна енергія руйнування. Нижня критична температура крихкості – нижче якої поверхня руйнування зразків є кристалічною. Зміну характеру руйнування для зразків у вихідному стані спостерігали в діапазоні температур $35 - 65 \text{ }^\circ\text{C}$, а для зразків після відпалу – в діапазоні $25 - 62 \text{ }^\circ\text{C}$. Достовірність отриманих даних забезпечується використанням атестованого експериментального обладнання і підтверджується результатами досліджень інших авторів [7]. При температурах, що знаходились нижче наведених інтервалів, зразки руйнувались. В зоні крихкого розповсюдження тріщини спостерігається транскристалітне як крихке так і квазікрихке руйнування. Останнє являє собою поверхню, що утворилась за рахунок розділення металу

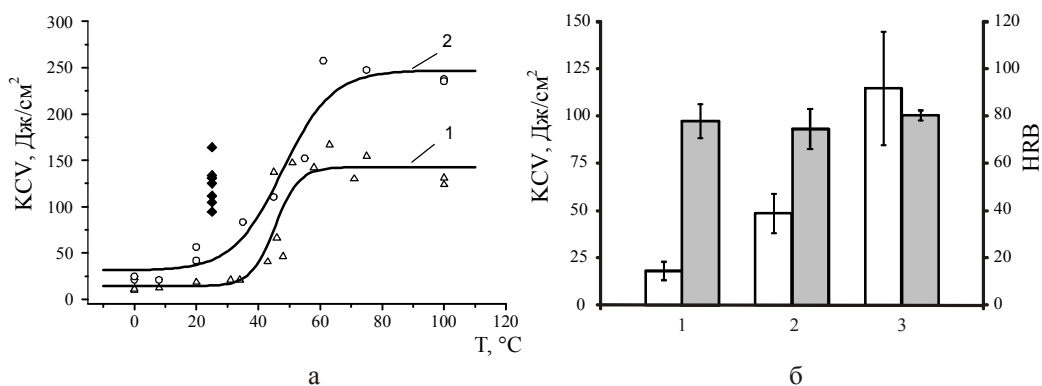


Рис. 1. Зміна ударної в'язкості KCV сталевих зразків в залежності від температури (а) та зміна середніх значень ударної в'язкості (не заштриховані області діаграми) і твердості при $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (б). Вихідний стан – 1, Δ , після відпалу – 2, \circ , та після обробки ІЕС – 3, \blacklozenge .

по тілу зерен шляхом квазівідколу. В зламах помітні пласкі ділянки – фасетки квазівідколу з характерною будовою, а також сходинки відколу, які сформувались в результаті поєднання двох поверхонь руйнування, що були розміщені на різних рівнях. Як видно на фрактограмах (рис. 2 а, б), лише на деяких ділянках зламів присутній ямковий рельєф, що утворився шляхом злиття мікропорожнин. Його кількість не перевищує 5 % від усїєї площі. Загальний вид поверхні руйнування свідчить про неоднорідність процесу деформування.

Навпаки зразки, оброблені ІЕС більш однорідні на мікрорівні; механізм руйнування – в'язкий, з явно вираженими ознаками пластичної деформації (рис. 2 в). Доля в'язкої складової на поверхні окремих зламів наближається до 100 %. Спостерігається розвинутий ямковий рельєф з видовженою формою ямок. Процес руйнування відривом зазвичай супроводжується значним рівнем поглинання енергії, що добре корелює з отриманими експериментальними даними. Так, при температурі 25 °С середнє значення ударної в'язкості після обробки ІЕС підвищилось у п'ять разів (від 18,33 Дж/см² до 104,95 Дж/см²) порівняно з вихідним матеріалом і в 2,5 рази відносно зразків після відпау.

Мікроструктура сталі Ст3 (рис. 2 г – е) складається із зерен фериту різної дисперсності та незначним рівномірним розподілом перлітної складової. Як у вихідному стані так і після обробки ІЕС розміри зерен та їх форма залишились незмінними, а твердість складає 78 HRB та 81 HRB відповідно (рис. 1 б). Дисперсність фериту – 8 бал [8], а середній розмір зерна дорівнює 20 мкм. В мікроструктурі зразків, що піддавали відпау (рис. 2 д), зеренна структура фериту збільшилась до 5 балу, а її середній розмір становить 50 мкм; дещо знизилась твердість – до 75 HRB. В тілі зерен спостерігаються виділення неметалевих включень. Також вони помітні по всій поверхні руйнування (рис. 2 б) на фасетках квазівідколу.

За результатами рентгеноструктурного аналізу відзначено звуження дифракційних ліній на рентгенограмі для зразків, крізь які пропускали струм, що свідчить про зменшення залишкових мікронапружень та анігіляцію дефектів в структурі сталі після обробки ІЕС. Також було зафіксовано значне підвищення інтенсивності відбиття для ліній площин з індексами (100), (211), (310) і зниження для площини (200) порівняно зі зразками матеріалу у вихідному стані. Зміна інтенсивності пов'язана з перерозподілом розмірів областей когерентного розсіювання та свідчить про процеси текстурування або підвищення однорідності структури. Переважне орієнтування зерен має напрям в площині (100).

Після відпау зразків при температурі 870 °С також спостерігалось зменшення інтенсивності полів залишкових мікронапружень і підвищення однорідності структури, що позитивно впливає на значення ударної в'язкості порівняно з матеріалом у вихідному стані. Але дані аналізу мікроструктури (рис. 2) показують, що стаціонарний нагрів призводить до зростання розміру зерна сталі, виділення та коагуляції неметалевих включень, що є негативним фактором. Також відпал зразків практично не вплинув на зміну їх механізму руйнування.

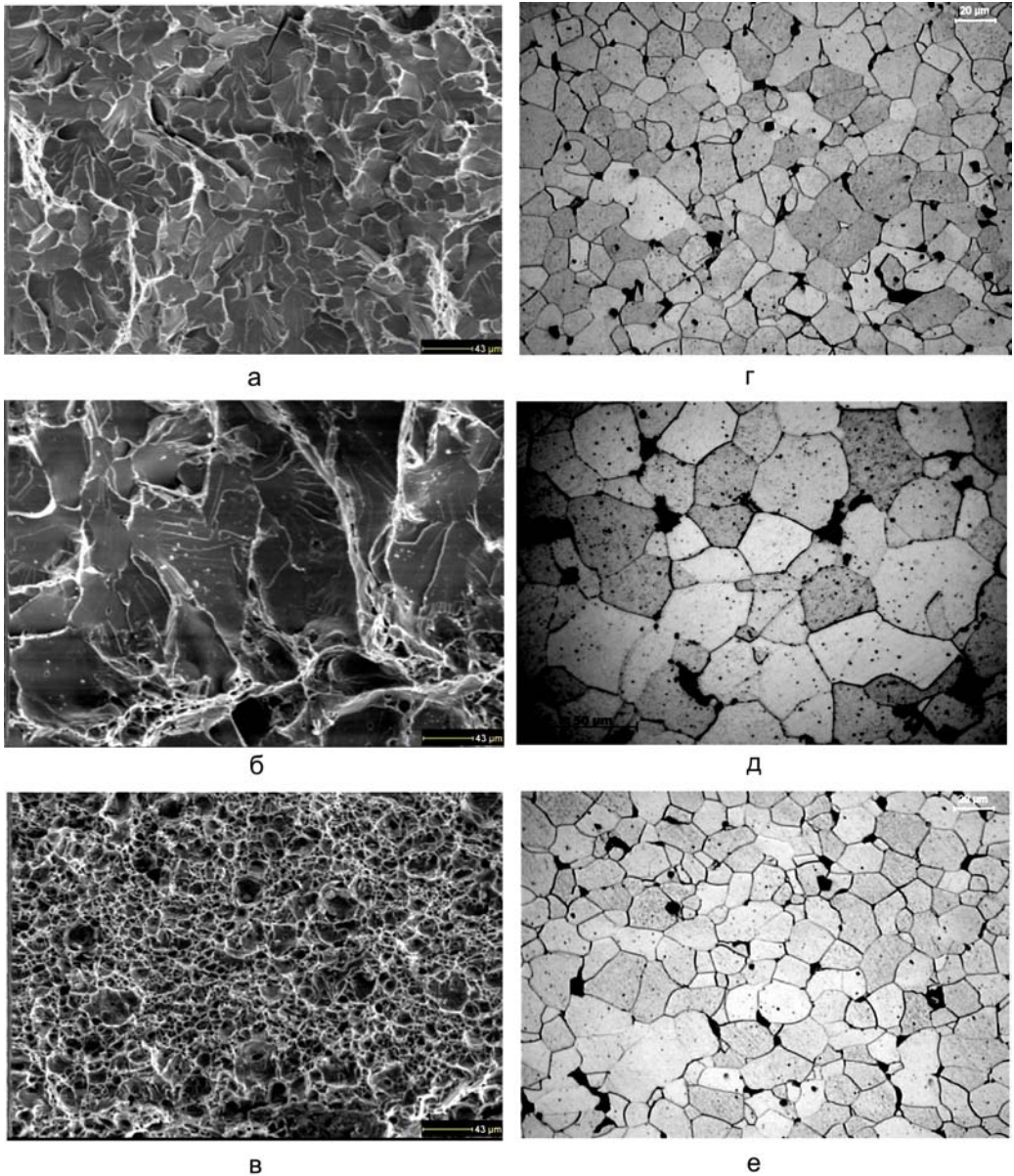


Рис. 2. Фрактограми поверхонь руйнування зразків (а – в) і мікроструктура сталі в поперечному перерізі (г – е). а, г – матеріал у вихідному стані, б, д – після відпалу, в, е – після обробки ІЕС. а – в х2000, г – е х500.

Таким чином збільшення ударної в'язкості сталі Ст3 після обробки ІЕС не може бути пояснене термічним впливом даної обробки через низьку температуру нагріву – кілька десятків градусів. Про це також свідчать дані металографічного аналізу, а саме стабільність розмірів зерен та коефіцієнти твердості. Її середнє значення залишається близьким до 80 HRB. Важливим фактом є зменшення розкиду їх значень в порівнянні з матеріалом у вихідному стані (рис. 1 б). Для зразків Шарпі зі сталі Ст3 після обробки ІЕС зміна відносного розсіювання значень твердості становить -72 %. Поряд з іншими зафіксованими результатами досліджень (підвищенням енергоємності та зміною

механізму руйнування, релаксацією напружень II-го роду, текстуруванням мікроструктури) ці данні свідчать, що обробка ІЕС приводить до стабілізації та підвищення однорідності матеріалу.

Відомо, що при обробці ІЕС струм переважно концентрується на різного типу дефектах кристалічної будови (дислокації, точкові дефекти, границі зерен, субзерен і мікротріщини) і саме на них відбувається розсіювання енергії електронів, що викликає локальний нагрів мікрооб'ємів металу [1]. Це створює умови для розвитку в області дефектів не пружних деформацій (мікроссувів), які приводять до релаксації полів мікронапружень навколо них. На макрорівні це може проявлятися в підвищенні однорідності ряду фізичних властивостей матеріалу, наприклад, твердості.

Після обробки ІЕС інтенсивність полів мікронапружень в матеріалі нижча, мікротріщини не виникають на ранніх стадіях навантаження – в результаті в процесі деформування приймає участь весь об'єм матеріалу, що підвищує його енергоємність. Таким чином, обробка ІЕС змінює механізм руйнування сталі Ст3 при кімнатній температурі, підвищує її пластичність, опір руйнуванню і, що більш важливо, знижує інтервал температур в'язкокрихкого переходу, що є наслідком підвищення однорідності деформації матеріалу на макро- і мікрорівнях.

Література

1. Беклемишев Н. Н., Шапиро Г. С. Пластичность и прочность проводящих материалов при действии высокоэнергетического электрического тока // Прочность, пластичность и вязкоупругость материалов и конструкций. – АН СССР (Уральский научный центр), 1986. – С. 20 – 28.
2. Коновалов С. В., Соснин О. В., Лейкина О. С. Повышение надежности изделий из среднеуглеродистых сталей импульсным токовым воздействием // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – 3. – С. 19 – 23.
3. Бабуцький А. І., Чижик Г. В., Пахотних А. П. Вплив обробки імпульсним електричним струмом на ударну в'язкість сталі // Металознавство та обробка металів. – 2007. – 2. – С. 19 – 23.
4. Бабуцький А. І., Мамеев І. А., Чижик Г. В. Вплив обробки імпульсним електричним струмом на залишкові напруження в тонкому покритті Ti – Al – Si – Ag // Металознавство та обробка металів. – 2008. – 2. – С. 54 – 57.
5. Степанов Г. В., Бабуцький А. І., Мамеев І. А. Влияние обработки импульсным током на остаточные напряжения, возникающие при шлифовании // Проблемы прочности. – 2009. – 6. – С. 44–50.
6. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. ГОСТ 9454-78. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.
7. Харченко В. В., Кондряков Е. А., Жмака В. Н. Влияние температуры и скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещины в образцах Шарпи из углеродистых сталей // Проблемы прочности. – 2006. – 5. – С. 120 – 127.
8. Сталь и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. ГОСТ 5639-82. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 25 с.

Одержано 25.05.13

Г. В. Степанов, А. В. Чижик, А. И. Бабуцкий, А. И. Позднякова

Использование обработки импульсным электрическим током для снижения склонности к хрупкому разрушению малоуглеродистой стали

Резюме

Исследовано влияние обработки импульсным электрическим током на структурный и фазовый состав малоуглеродистой стали Ст3. Отмечено, что данный вид обработки приводит к смещению температурного интервала вязко-хрупкого перехода стали в сторону более низких температур.

G. V. Stepanov, A. V. Chyzhyk, A. I. Babutsky, A. I. Pozdnyakova

Using of Pulse Current Treatment for reduction of liability to brittle fracture in low carbon steels

Summary

In the present study the influence of Pulse Current Treatment on the structure and phase composition of Ст3 low carbon steel has been investigated. It has been noted that the treatment of such kind causes a shift of temperature range of ductile-brittle transition towards the lower temperatures for steel.

УДК 539.43

Міцність та циклічна тріщиностійкість литих графітованих сталей

І. М. Андрейко, кандидат технічних наук

В. В. Кулик, кандидат технічних наук

О. П. Осташ, доктор технічних наук, професор

В. Б. Бубликов*, доктор технічних наук

Д. С. Козак*, кандидат технічних наук

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Досліджено вплив вмісту 0,14 – 0,33 % марганцю і 0,85 – 1,37 % кремнію на структуру матриці і графітної фази, а також механічні характеристики литих графітованих сталей, що містять 1,19 – 1,25 % вуглецю. Встановлено, що за характеристиками міцності і циклічної в'язкості руйнування у литому стані оптимальними є графітовані сталі з вмістом 1,19 % вуглецю, 0,94 % кремнію і 0,33 % марганцю.

Традиційними матеріалами для сучасного машинобудування є залізобуглецеві сплави – сталі та чавуни. Основною структурною відмінністю між ними є наявність графітових включень. Проте вона зникає з появою графітованих