

**ПРО ОСЕРЕДКИ ЗАРОДЖЕННЯ КОРОЗІЇ В СТАЛЯХ,
ЩО ПІДДАНІ ЛАЗЕРНІЙ ДІЇ**

Губенко С.І.

Інститут черної металургії НАН України, УДУНТ: Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро, Україна

Анотація. Досліджено вплив лазерної дії на зародження та розвиток корозійних пошкоджень у сталях поблизу неметалевих включень. Встановлено, що лазерна обробка підвищує корозійну стійкість в умовах малоциклової втоми сталей, які містять різні включення. Показано, що вплив лазерної обробки на підвищення опору сталей до утворення корозійних пошкоджень пов'язаний зі зміною стану міжфазних границь включення-матриця, що сприяє зниженню їх проникності для корозійних елементів і підвищенню когезійної міцності цих границь в активних середовищах.

Ключові слова: *Сталь, неметалеві включення, лазерна обробка, корозія, межі включення-матриця, малоциклова довговічність.*

Вступ. Дослідження різних виробів та деталей, зокрема деталей конструкцій, залізничних коліс тощо показало, що корозійне руйнування є серйозною проблемою та суттєво впливає на надійність та довговічність цих виробів при експлуатації [1]. Відомо, що корозійні пошкодження часто виникають поблизу неметалевих включень [1–3]. Відомо, що лазерний вплив сприяє підвищенню корозійної стійкості сталей і сплавів, проте не досліджено впливу неметалевих включень на зазначене явище. Метою роботи було вивчення впливу лазерної обробки на зародження корозійних ушкоджень поблизу неметалевих включень за впливу активних середовищ.

Матеріали та методики. Дослідження проводили на спеціально отриманих плавках низьковуглецевої листової сталі 08 та колісної сталі R7, що були програмно забруднені різними типами неметалевих включень: для сталі 08 та R7 відповідно пл. 1 і 5 - сульфід (Fe, Mn)S, FeS-MnS, пл. 2 та 6 – корунд, шпінель Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$, пл. 3 та 7 – силікати SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$, пл.4 та 8 – TiCN [1–3]. При випробуваннях застосовували середовища: 1 - повітря, 2 - 5% водний розчин NaCl, 3 - 1% водний розчин H_2SO_4 . Частину зразків перед корозійними випробуваннями піддавали лазерній обробці на установці

"Квант-16" ($W_{\text{имп}} 25$ Дж, час дії $3 \cdot 10^{-3}$ с). Використовували металографічний (Неофот-21) та петрографічний методи досліджень [1-3].

Результати досліджень та їх обговорення. Під час випробувань на повітрі на малоциклову втому сталей, спостерігається вплив типу неметалевих включень на їх втомні характеристики (табл. 1). Корозійне середовище призвело до істотного зниження довговічності сталей за малоциклової втоми N за наявності неметалевих включень. У міру збільшення довговічності сталей дослідні плавки вишикувалися в зростаючий ряд: найнижча величина N у сталей, забруднених сульфідами (пл. 1,5), потім вона збільшується за наявності відповідно корунду та шпінелей (пл. 2, 6), силікатів (пл. 3,7) і, нарешті, карбонітридів титану (пл. 4, 8). Крім того, визначені коефіцієнти впливу середовища β_c , що становлять відношення довговічності колісної сталі на повітрі до аналогічного показника у корозійному середовищі. Очевидно, що більше величина цього коефіцієнта, то сильніше знижують неметалеві включення малоциклову довговічність сталей.

Порівняльний аналіз результатів випробувань показав, що попередня лазерна дія призвела до збільшення довговічності сталей за малоциклової втоми при випробуваннях на повітрі та у середовищах на 25%...42% (табл. 1). У той же час і після ЛО зберігся вплив типу неметалевих включень: найнижча величина N отримана для сталей, забруднених сульфідами (пл. 1, 5), потім вона збільшується за наявності відповідно корунду та шпінелі (пл. 2, 6), силікатів (пл. 3, 7) і, нарешті, карбонітридів титану (пл. 4, 8). Крім того, величина коефіцієнта впливу середовища β_c залишилася для різних типів включень приблизно на одному рівні як без попереднього лазерного впливу, так і після нього. Таким чином, корозійне середовище призвело до зниження довговічності сталей за малоциклової втоми за наявності всіх типів неметалевих включень у разі попереднього лазерного впливу (табл. 1), проте спостерігається позитивний вплив цієї дії на малоциклову довговічність N в порівнянні зі зразками, які не піддавалися ЛО.

Таблиця 1

Малоциклова довговічність N сталі 08 (чисельник)
 і колісної сталі R7 (знаменник) на повітрі та у корозійних середовищах,
 а також коефіцієнт впливу середовища β_c

середовище	плавка, включення	$N \cdot 10^4$, циклів		..	
		без ЛО	після ЛО	без ЛО	після ЛО
1	пл.1, 5	1,2 / 1,2	1,6 / 1,57	-	-
	пл.2	1,7 / 1,8	2,2 / 2,3	-	-
	пл.3, 7	2,1 / 2,0	2,7 / 2,8	-	-
	пл.4, 8	2,3 / 2,2	3,1 / 3,0	-	-
2	пл.1, 5	0,6 / 0,6	0,8 / 0,79	2,0 / 2,0	2,0 / 2,0
	пл.2, 6	1,1 / 1,2	1,42 / 1,5	1,5 / 1,5	1,54/1,53
	пл.3, 7	1,4 / 1,4	1,9 / 1,9	1,5 / 1,43	1,42/1,47
	пл.4, 8	1,7 / 1,6	2,3 / 2,3	1,3 / 1,38	1,34 / 1,3
3	пл.1, 5	0,52 / 0,5	0,7 / 0,7	2,3 / 2,4	2,4 / 2,3
	пл.2, 6	1,00/1,01	1,28/1,29	1,7 / 1,78	1,71/1,77
	пл.3, 7	1,1 / 1,2	1,61/1,66	1,75 / 1,67	1,68/1,69
	пл.4, 8	1,4 / 1,4	2,03/1,94	1,57/1,57	1,52/1,54

Дослідження сталей після випробувань на малоциклову втому у різних середовищах показали, що корозійні пошкодження зароджувалися на неметалевих включеннях всіх типів без попереднього лазерного впливу (рис. 1, а). Практично завжди процес корозії починається на міжфазних границях включення-матриця, потім поширюється в сталеву матрицю і в неметалево включення. У разі попереднього лазерного впливу також спостерігали зародження корозійних пошкоджень поблизу включень і уздовж границь включення-матриця (рис. 1, б - г), але за однакового часу корозійних випробувань ці пошкодження були значно меншими.

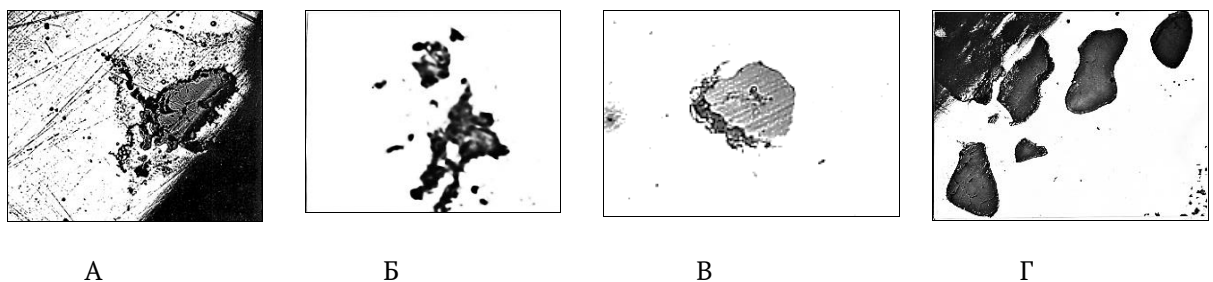


Рис. 1. Корозійні пошкодження на неметалевих включеннях $(Fe, Mn)S$ (А, Б), $MnO \times Al_2O_3$ (В), $MnO \cdot SiO_2$ (Г) в сталі 08 без попередньої лазерної дії (А) і в сталі R7 у випадку попередньої лазерної дії (Б - Г) після випробувань у середовищах: $\times 600$.

Необхідно враховувати, що міжфазні границі включення-матриця є готовими каналами для проникнення атомів поверхнево активної речовини з навколишнього середовища, що обумовлено дефектною структурою цих меж і

наявністю міжфазних напружень [4, 5]. Корозія викликає додаткові напруження в границях включення-матриця через розклинюючу дію продуктів корозії, які утворилися, що сприяє розвитку втомних тріщин від неметалевих включень в сталеву матрицю. Підвищення довговічності сталей за малоциклової втоми та корозійної стійкості сталей після лазерного впливу, очевидно пов'язане з фазовими та структурними змінами, що відбуваються поблизу включень в момент лазерної обробки, коли спостерігається швидкісне плавлення включень, пересичення сталеві матриці їх елементами, а також зміна стану міжфазних границь включення-матриця, що призводить до мікрозварювання включень і сталеві матриці [6 - 9]. Очевидно, локальне мікрозварювання, що пройшло уздовж міжфазних границь включення-матриця за лазерного впливу, сприяло зниженню їх проникності для корозійно-активних елементів та підвищенню когезивної міцності цих границь в активних середовищах.

Аналіз результатів, що наведені у таблиці 1, дозволив умовно розділити неметалеві включення на дві групи, незалежно від застосування лазерного впливу. У першу групу входять сульфідні включення $(Fe, Mn)S$, $FeS - MnS$, для яких коефіцієнт впливу середовища β_c в 5% водному розчині $NaCl$ становить 2,0, в 1% водному розчині H_2SO_4 – 2,3...2 4. До другої групи входять всі інші включення, а саме корунд і шпінелі Al_2O_3 , $MnO \times Al_2O_3$, силікати SiO_2 , $MnO \times SiO_2$, $FeO \times SiO_2$, карбонітрид титану $TiCN$, для яких величина β_c у середовищі 5% водного розчину $NaCl$ становить 1,3...1,54, у середовищі 1%-ного водного розчину H_2SO_4 – 1,52...1,78. Така відмінність пов'язана зі знаком термічних напружень поблизу включень різних типів [1]. Відомий ефект впливу напружень, що є стискаючими, на пригнічення адсорбційного ефекту. Залишкові напруження, що є розтягуючими, посилюють адсорбційні і корозійні втомні явища [1], тобто такі напруження поблизу неметалевих включень значно збільшують число „активних” ультрамікротріщин в сталі. Розрахунки, що були проведені раніше, та дослідження термічних напружень показали, що тільки поблизу сульфідів вони є розтягуючими, поблизу інших включень, що вивчаються в даній роботі, – стискаючими [1].

Відповідно до електрохімічної теорії корозійної втоми, поява ділянок на поверхні виробу, що являють собою "виразки" з вихідними неметалевими включеннями і продуктами корозії на міжфазних межах включення-матриця, викликає додаткові концентрації напружень. Ці напруження сприяють неоднорідному розподілу потенціалу: на дні таких виразок виникає більш позитивний потенціал, ніж у стінок або поблизу зовнішньої поверхні виробу. Дно таких утворень стає анодною ділянкою, сприяючи подальшій корозії та поглибленню корозійних пошкоджень від неметалевих включень у глиб виробу. У той же час попередня лазерна обробка впливає на поведінку границь включення-матриця в активних середовищах, знижуючи їхню проникність для корозійних процесів.

Висновки. Встановлено, що лазерна обробка сприяє підвищенню корозійної стійкості і довговічності за малоциклової втоми сталей, що містять включення на 25...42%, надаючи позитивний вплив на показники малоциклової довговічності. Оскільки лазерна обробка не впливає на знак термічних напружень поблизу різних типів неметалевих включень, її вплив на підвищення стійкості сталей до утворення корозійних пошкоджень пов'язаний із зміною характеру міжфазних меж включення-матриця. Очевидно, локальне мікрозварювання, що пройшло вздовж міжфазних меж включення-матриця під час лазерного впливу, сприяло зниженню їх проникності для корозійно-активних елементів та підвищенню когезивної міцності цих меж в активних середовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Губенко С.І., Ошкадеров С.П. Неметалеві включення в сталі. - Київ: Наукова думка, 2016. - 528с.
2. Gubenko S. I. Corrosive Damage Close to Nonmetallic Inclusions in Bearing Steels/Gubenko S. I., Sychkov A. B., Parusov E. V., Denisenko A. I. // Steel in Translation. 2018. - v. 48. - No. 3. - p. 197–201.
3. Gubenko S. I. Effect of Laser Surface Treatment on the Initiation of Corrosion Defects near Nonmetallic Inclusions. Materials Science. 2022. - v. 58. - No. 3. - p. 313-317.
4. Губенко С.І. До питання про будову міжфазних кордонів неметалевого включення-матриця в сталі // Металлы. 1994. - No. 6. - с.105-112.

5. Gubenko, S.I., Parusov, E.V., Parusov, O.V. The role of inclusion-matrix boundaries in steels fracture processes // Chernye Metally. 2021. - No. 6. - p. 42–47.
6. Gubenko S.I., Nikul’chenko I.A Fragmentation of Nonmetallic Inclusions during Local Remelting upon Laser Steel Processing // Steel in Translation. 2020. - v. 50. - No. 3. - p.203-208.
7. Gubenko S. Melting and crystallization of nonmetallic inclusions and steel matrix in the course of laser treatment. // Materials Science. 2010. - v. 46. - No. 3. - p. 365-371.
8. Gubenko S.I. Zones of contact interaction in steel matrix near inclusions under the laser action // Materials Science. 2011. - v.46. - No. 4. - p.448-452.
9. Hubenko S.I. Influence of Laser Treatment on the Strength of “Inclusion–Steel Matrix” Interfaces Under Plastic Deformation // Materials Science. 2017. - v. 53. - No. 1. - p.36-41.

ON THE CENTERS OF CORROSION INITIATION IN STEEL SUBJECTED TO LASER ACTION

Svetlana Gubenko

Abstract. *The effect of laser action on the initiation and development of corrosion damages in steels near non-metallic inclusions has been investigated. It has been established that laser treatment enhances the corrosion resistance in low-cycle fatigue of steels containing various inclusions. It is shown that the effect of laser treatment on increasing the resistance of steels to the formation of corrosion damages is associated with a change in the state of the inclusion-matrix interphase boundaries, which contributes to a decrease in their permeability for corrosive elements and an increase in the cohesive strength of these boundaries in active media.*

Keywords: *Steel, non-metallic inclusions, laser processing, corrosion, inclusion-matrix boundaries, low-cycle durability.*

REFERENCE

1. Gubenko S.I., Oshkaderov S.P. Non-metallic inclusions in steel. - Kyiv: Naukova Dumka, 2016. - 528 p.
2. Gubenko S. I. Corrosive Damage Close to Nonmetallic Inclusions in Bearing Steels/Gubenko S. I., Sychkov A. B., Parusov E. V., Denisenko A. I. // Steel in Translation. 2018. - v. 48. - No. 3. - p. 197–201.
3. Gubenko S. I. Effect of Laser Surface Treatment on the Initiation of Corrosion Defects near Nonmetallic Inclusions. Materials Science. 2022. - v. 58. - No. 3. - p. 313-317.
4. Gubenko S.I. On the question of the structure of interphase boundaries, non-metallic inclusion-matrix in steel // Metals. 1994. - No. 6. - p.105-112.
5. Gubenko, S.I., Parusov, E.V., Parusov, O.V. The role of inclusion-matrix boundaries in steels fracture processes // Chernye Metally. 2021. - No. 6. - p. 42–47.

6. Gubenko S.I., Nikul'chenko I..A Fragmentation of Nonmetallic Inclusions during Local Remelting upon Laser Steel Processing // Steel in Translation. 2020. - v. 50. - No. 3. - p.203-208.
7. Gubenko S. Melting and crystallization of nonmetallic inclusions and steel matrix in the course of laser treatment. // Materials Science. 2010. - v. 46. - No. 3. - p. 365-371.
8. Gubenko S.I. Zones of contact interaction in steel matrix near inclusions under the laser action // Materials Science. 2011. - v.46. - No. 4. - p.448-452.
9. Hubenko S.I. Influence of Laser Treatment on the Strength of “Inclusion–Steel Matrix” Interfaces Under Plastic Deformation // Materials Science. 2017. - v. 53. - No. 1. - p.36-41.