

# ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК З КИСНЕВО-КОНВЕРТОРНОЇ СТАЛІ К76Ф

В.І. Швець, Л.М. Капітанчук, І.В. Зяхор, О.В. Дідковський, Є.В. Антіпін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича 11. E-mail: zyakhor2@ukr.net

Досліджено поверхні зламів рейкової сталі К76Ф після випробувань на статичний згин зварних стиків рейок, виконаних контактним стиковим зварюванням оплавленням. Стики рейок окремих партій руйнувалися по основному металу або зоні термічного впливу. Показано, що на ділянках темного кольору овальної форми має місце руйнування по плівці оксиду заліза. Формування плівок відбувається в результаті оплавлення та розповсюдження структурними границями включень оксиду заліза імовірно в термомеханічних умовах обтискного цеху на стадії виробництва блюмінгів. Утворення скупчень оксидів заліза відбувається при кристалізації залишкового розплаву в зливках сталі та є свідченням недостатнього ступеня розкислення рейкової сталі та фактором зниження її якості. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 10.

*Ключові слова:* рейкова сталь К76Ф, розкислення, контактнo-стикове зварювання, оксид заліза

**Вступ.** В даний час для виплавки рейкової сталі переважно використовується киснево-конверторний спосіб. У порівнянні з мартенівським він відрізняється більш високою продуктивністю, меншими капітальними витратами, більш сприятливими умовами для механізації та автоматизації виробничих процесів, поєднанням процесу виплавки сталі з безперервним розливанням. Суть киснево-конверторного способу полягає у продуванні в агрегаті-конверторі рідкого чавуну киснем. Під дією кисню окислюються і виводяться з розплаву домішки чавуну, такі як марганець, кремній і, насамперед, вуглець.

В АТ «Укрзалізниця» використовуються рейки типу Р65 марки К76Ф конверторного виробництва, загартовані з індукційного нагрівання по всій довжині поверхні катання та бічних граней [1]. Результати кваліфікаційних випробувань показали, що розроблена технологія виготовлення рейок забезпечувала відповідність їх властивостей вимогам нормативних документів [2]. Для з'єднання рейок при спорудженні залізничних колій застосовувалась технологія контактного стикового зварювання, яка була розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та успішно використовується на практиці [3, 4].

При випробуванні на статичний механічний згин руйнування з'єднань рейок зазвичай відбувається по стику. З'єднання рейок окремих партій руйнувалися по основному металу або зоні термічного впливу. При візуальному контролі на поверхні зламів виявлені ділянки овальної форми, які завдяки особливостям рельєфу мали темний колір. В роботі ці ділянки визначені як «овальні плями» (ОП) (рис. 1). ОП, які були зародками руйнування Швець В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-4653-7453>, Зяхор І.В. – <http://orcid.org/0000-0001-7780-0688>, Дідковський О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5268-5599>, Антіпін Є.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3297-5382>  
© В.І. Швець, Л.М. Капітанчук, І.В. Зяхор, О.В. Дідковський, Є.В. Антіпін, 2024

стиків, розташовувались переважно у головці рейки (рис. 1, а), рідше – у підшві (рис. 1, б).

Мета роботи полягала у встановленні природи та причин утворення ОП на поверхні зламу зварних стиків рейок К76Ф.

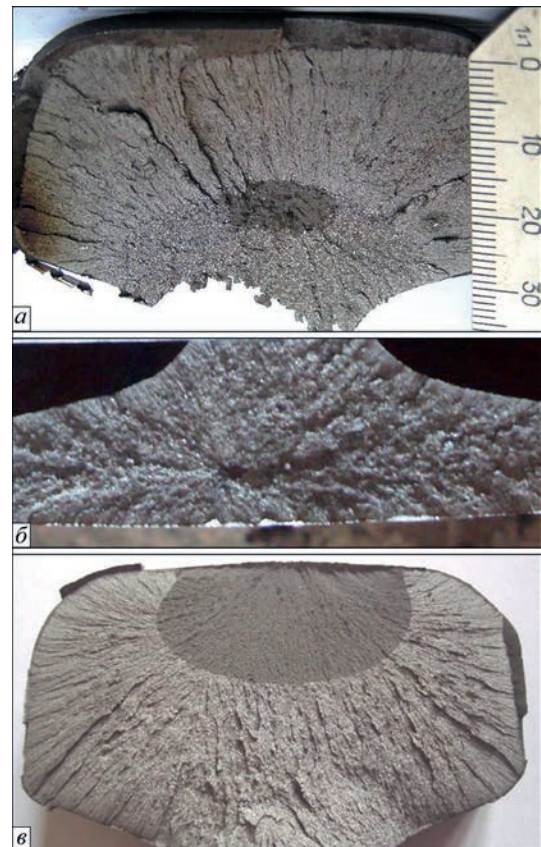


Рис. 1. Овальні плями на поверхні зламу рейок: а – в області головки; б – в області підшви; в області головки на відстані 7 мм від лінії з'єднання

Хімічний склад рейок К76Ф, мас. %

Елемент	C	Mn	Si	V	Ti	Cr	P	Al	S
Марочний склад	0,71...0,82	0,80...1,30	0,25...0,45	0,03...0,07	-	≤0,15	≤0,035	≤0,015	≤0,04
Склад рейок, що досліджували	0,76	0,85	0,317	<0,02	0,005	0,04	0,013	0,015	<0,03

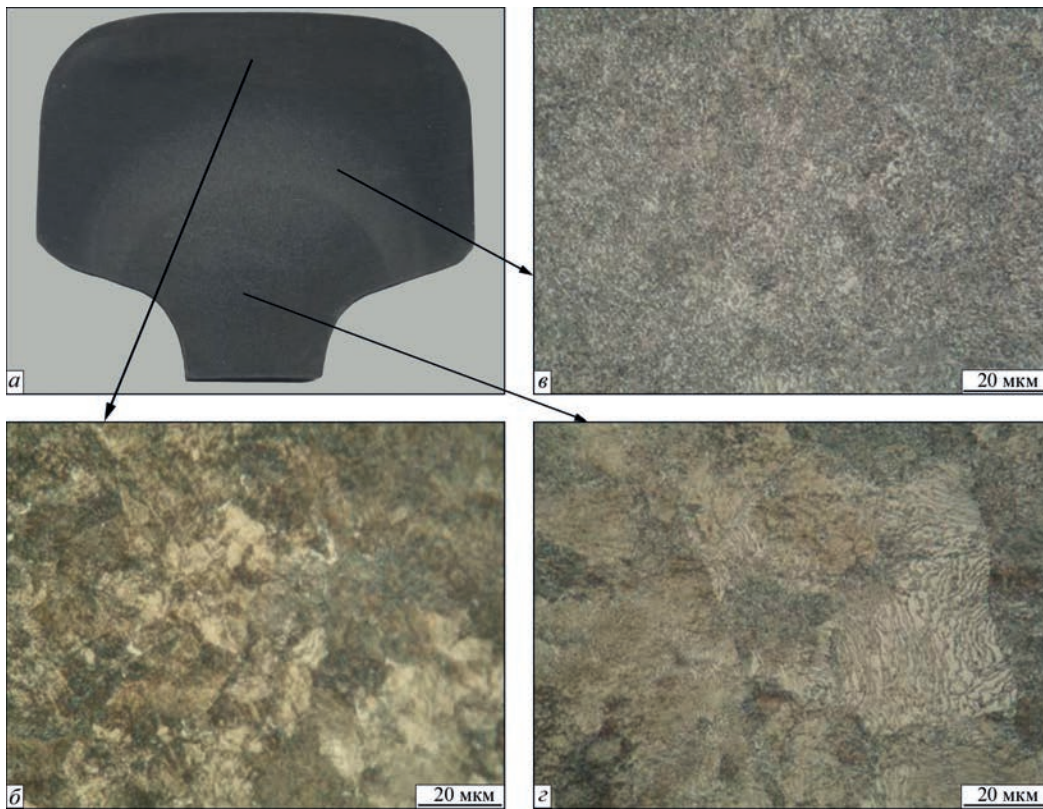


Рис. 2. Макроструктура рейки в області головки (а). Мікроструктура (×1000): б – приповерхневого шару; в – ділянки відпуску; г – основного металу

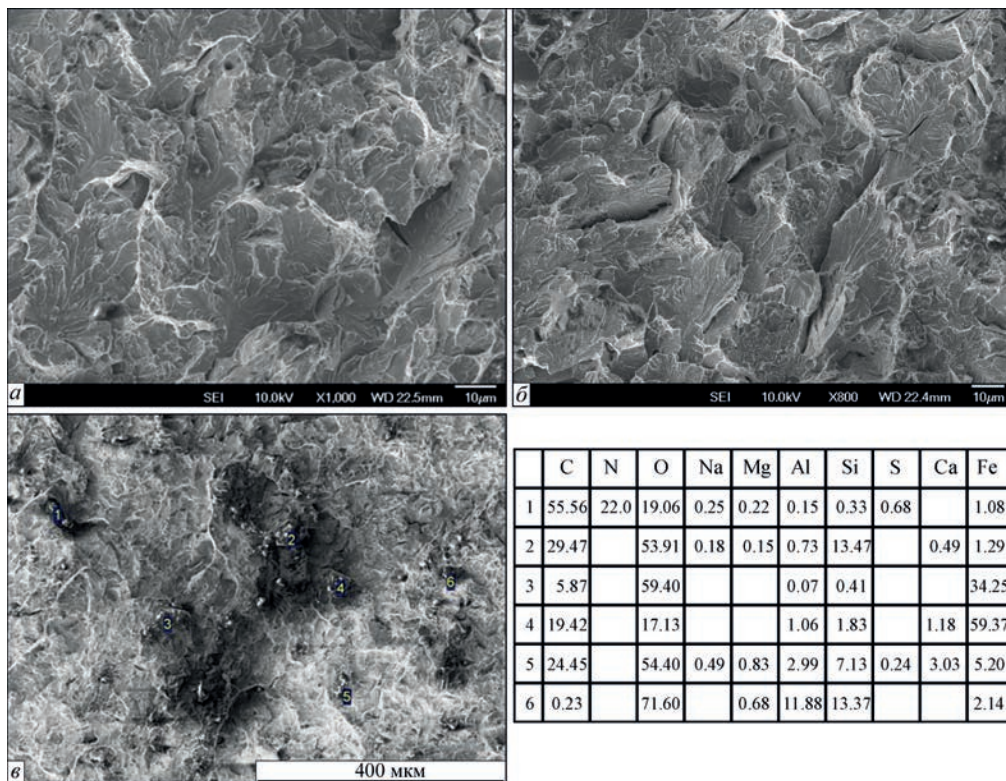


Рис. 3. Поверхня зламу на ділянці термозміцненого шару (а, б), неметалеві включення (в) та результати рентгенівського мікроаналізу хімічного складу (ат. %)

**Методика та обладнання.** Досліджували рейки К76Ф після руйнування стиків під час випробувань на статичний згин. Аналіз макроструктури рейок здійснювали на темплетях, вирізаних в поперечному напрямку. Дослідження мікроструктури проводили на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ-32, оснащеному цифровим фотоапаратом. Мікроструктуру виявляли травленням попередньо полірованих зразків у 4 %-ному спиртовому розчині  $\text{HNO}_3$ . Для аналізу мікроструктури та хімічної неоднорідності поверхні зламу при руйнуванні по основному металу використовували ОЖЕ-мікрозонд JAMP 9500F фірми JEOL (Японія), на якому встановлено рентгенівський енергодисперсійний спектрометр JNCA Penta FET x3

фірми Oxford Instrument. Енергія первинного електронного пучка становила 10 keV при струмі 0,5 nA для методу мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) та 10 nA для методу оже-електронної спектроскопії. Для побудови розподілу елементів по глибині поверхня зразків бомбардувалась іонами  $\text{Ar}^+$  (іонне травлення) з енергією 3 keV і швидкістю травлення 20 нм/хв. Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі NOVOTEST TC-GPB з навантаженням 292,4Н (30 кг).

**Результати досліджень та обговорення.** Згідно з результатами спектрального аналізу хімічний склад металу рейок, що досліджувалися, відповідає марочному (таблиця). Макроструктура рейок не виявляє порушень суцільності

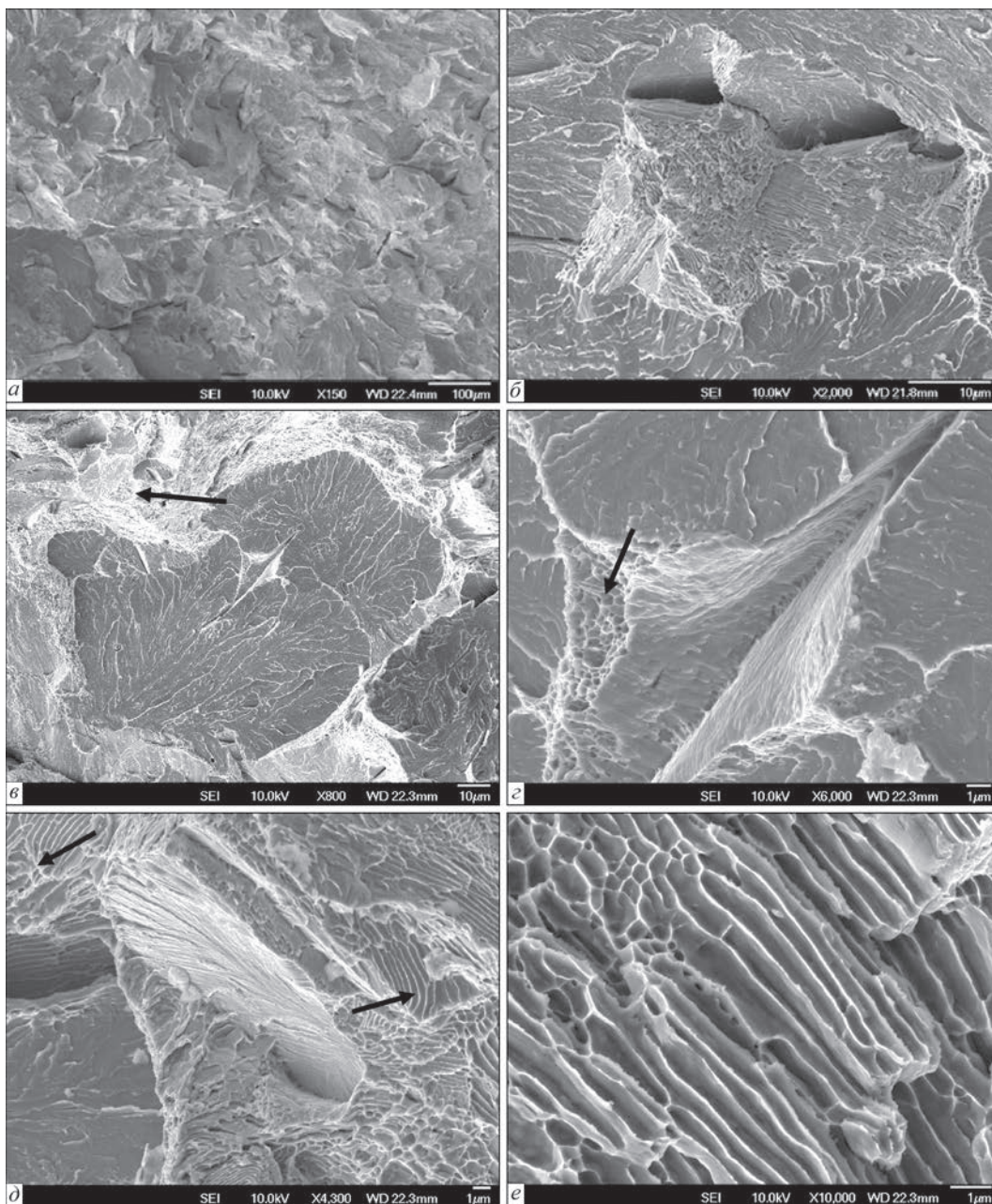


Рис. 4. Поверхня зламу на ділянці відпуску (а, б); розкриття металу по плівці оксиду заліза (в, г); розкриття металу по перлітним колоніям (д, е)

металу. В області головки чітко виявляються характерні для рейок після поверхневої термообробки ділянки зони термічного впливу (рис. 2, а). Поблизу поверхні катання спостерігається термозміцнений шар темного кольору шириною до 15 мм. До нього примикає шар сірого кольору (ділянка відпуску), що відрізняється зниженою, порівняно з приповерхневим шаром та основним металом, твердістю: *HV* 2430...2680 МПа, *HV* 3590...3800 МПа і *HV* 2700...3040 МПа відповідно. Мікροструктура приповерхневого шару темного кольору – сорбітна (рис. 2, б), сірого шару і основного металу – сорбіто-перлітна (рис. 2, в, г).

Фрактографічні дослідження поверхні зламу при руйнуванні по основному металу показали, що в межах термозміцненого шару злам транскристалітний. Поверхня зламу складається з фасеток внутрішньозеренного сколу з елементами пластичної деформації: струмковий візерунок, язички, гребені відриву (рис. 3, а). В окремих місцях зустрічаються вторинні тріщини (рис. 3, б). Неметалеві включення на поверхні зламу представлені складними оксидами алюмінію, кальцію, кремнію (рис. 3, в; таблиця). Утворення скупчень оксидів є причиною формування розвиненого рельєфу на цій ділянці.

На ділянці відпуску злам переважно транскристалітний, проте руйнування супроводжується утворенням фасеток сколу (рис. 4, а). Поряд з фасетками сколу в мікροструктурі присутні численні вторинні тріщини (рис.4, б), спостерігаються місця розкриття металу по плівковій структурній складовій (рис. 4, в, г) та перлітних колоніях (рис. 4, д, е).

На ділянці ОП, на відміну від ділянок відпуску та термозміцненого шару, злам міжкристалітний (рис. 5, а). Поверхня руйнування ямкова (рис. 5, б). Згідно з хімічним складом частинки, що розташовуються в ямках і визначають характер зламу, є оксидом заліза (рис. 5, в; таблиця). Розмір частинок становить десятки частки мікрона.

З використанням методу оже-електронної спектроскопії проведено аналіз елементного складу та його зміни при пошаровому іонному травленні поверхні ямки. На рис. 6 наведено місце зйомки, спектри до і після іонного травлення, а також таблиця з вмістом елементів, що розрахований за спектрами. Як видно, поверхневий шар містить залізо, кисень та незначну кількість алюмінію. Згідно з профілем розподілу елементів за глибиною, ширина шару з відмінним від основного металу елементним складом склала близько 50 А (рис. 7). Результати дослідження дають підстави вважати, що розкриття металу на ділянці ОП відбувається по

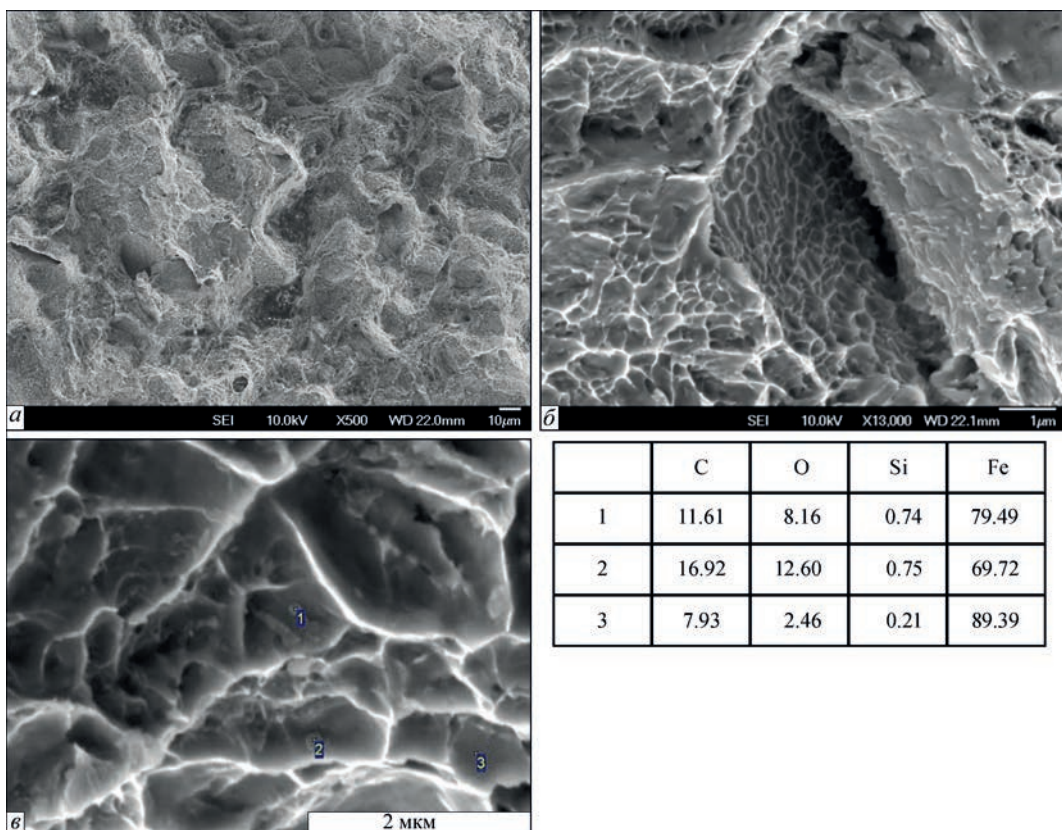


Рис. 5. Поверхня зламу на ділянці ОП (а, б), частинки на фасетках міжзеренного руйнування (в) та результати рентгенівського мікроаналізу хімічного складу (ат. %)

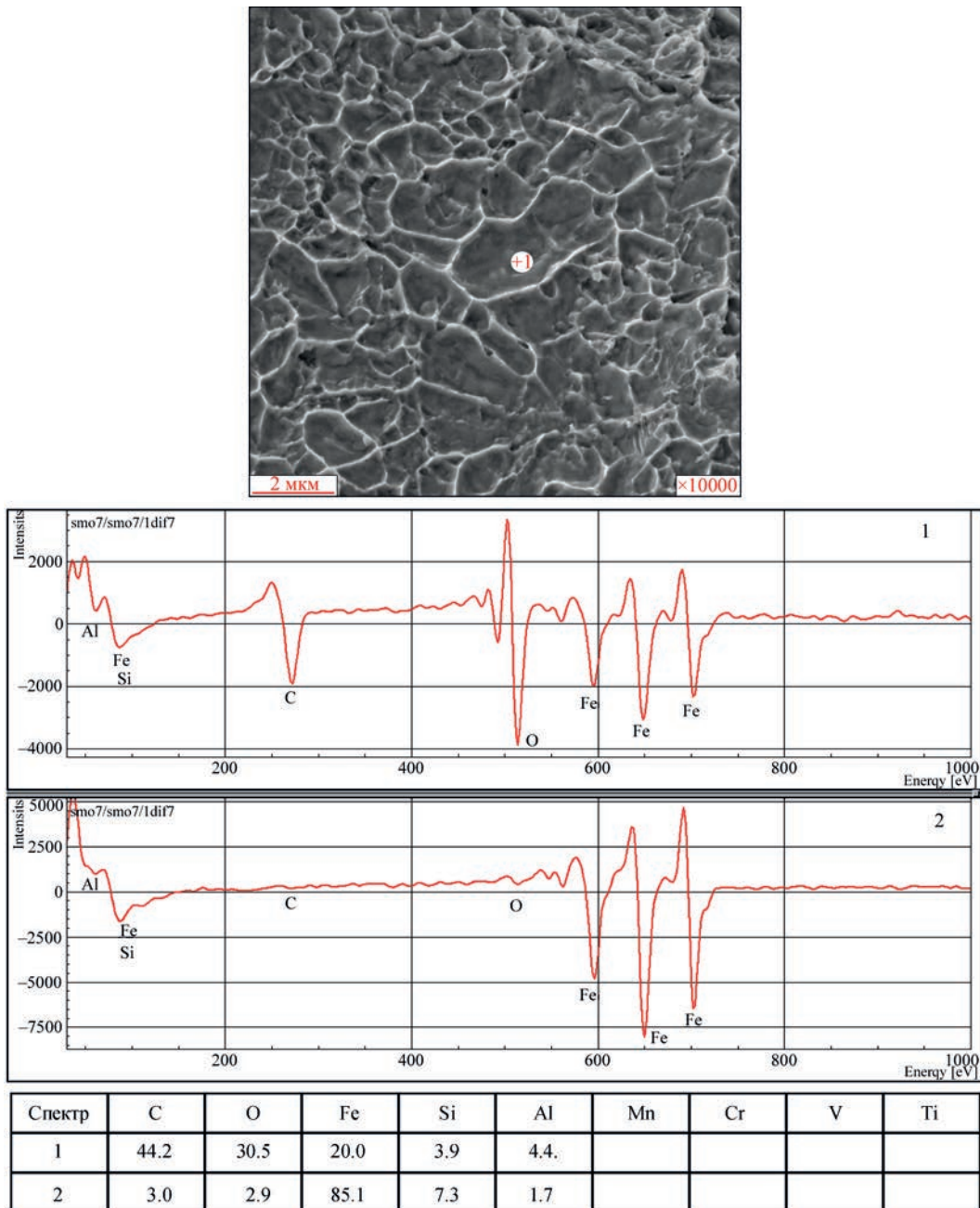


Рис. 6. Результати оже-спектрального аналізу поверхні ямок на ділянці ОП (ат. %): 1 – до іонного травлення; 2 – після іонного травлення

оксидній плівці, що розташовується на границях зерен. Очевидно плівка є складним оксидом, переважно заліза з деякою кількістю оксиду алюмінію.

Отже, згідно з фрактографічними дослідженнями, характер зламу визначається з одного боку мікроструктурою рейкової сталі, з іншого – наявністю оксидів. У межах ОП визначальним чинником є оксидна плівка. На ділянці відпуску при меншій кількості оксидних плівок, значну роль відіграє мікроструктура металу, що забезпечує, на відміну від крихкого руйнування термозміцненого шару деяку пластичність сталі.

З метою встановлення походження оксидних плівок проведено металографічні дослідження

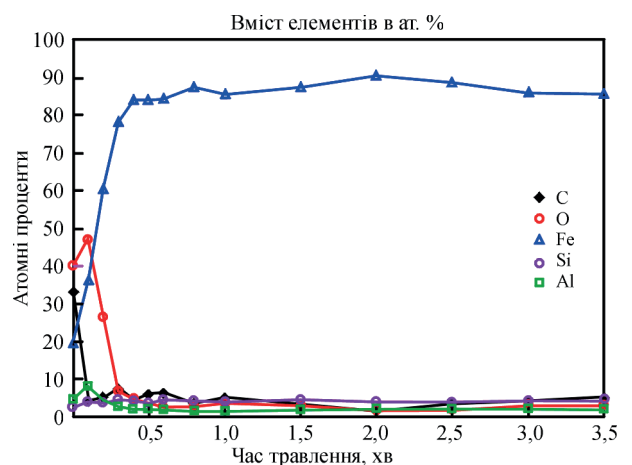


Рис. 7. Розподіл елементів по глибині від поверхні ямок на ділянці ОП при швидкості травлення 20 нм/хв

металу рейки на ділянці, що примикає до ОП. На полірованій поверхні поперечного перерізу виявлено багаточисленні неметалічні включення (рис. 8). Згідно з даними мікрорентгеноспектрального аналізу, поряд із характерними для конверторної рейкової сталі включеннями складних оксидів алюмінію, кремнію, кальцію в металі спостерігаються численні оксиди заліза (рис. 9). Оксиди заліза розташовуються переважно по границях зерен. Очевидно, наявність значної кількості оксидів заліза пов'язана з недостатнім ступенем розкислення рейкової сталі.

Неоднорідний розподіл та утворення скупчень оксидів заліза зумовлені особливостями кристалізації зливоків [5]. Малорозчинні у залізі домішки, зокрема кисень, відтісняються в залишковий розплав. В місцях кристалізації залишкового розплаву на структурних границях виділяються оксиди заліза.

Відомо [6], що система Fe–O характеризується наявністю оксиду FeO (вюстит) із температурою плавлення 1380 °C. Між залізом і вюститом утворюється евтектика при 1368 °C. FeO у складі оксидних включень, значно знижує як температуру їх плавлення, так і в'язкість [7]. Так, у системі

FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> існує евтектика з температурою плавлення 1329 °C, у системі FeO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – евтектика з температурою 1148 °C, у системі FeO–SiO<sub>2</sub>–CaO – потрійна евтектика з температурою нижче 1100 °C. З урахуванням рівня температур плавлення перелічених оксидних систем очевидно, що в рейковій сталі з недостатнім ступенем розкислення існують передумови формування оксидних плівок. Так, плівки оксиду заліза в рейках (див. рис. 1, а, б) імовірно формуються на стадії виробництва блюмінгів в обтискному цеху [8]. При контактному стиковому зварюванні рейок в термодформційних умовах формування з'єднання, утворення плівок може отримати розвиток. В цьому випадку завдяки деформації металу неметалеві включення оксидів алюмінію, кремнію, кальцію вступають у взаємодію з оксидами заліза. В результаті знижується температура плавлення оксидних плівок та зменшується в'язкість розплаву на торцях деталей. Як наслідок, площа ОП, виявленої на поверхні зламу на відстані 7 мм від лінії з'єднання, значно більша, ОП поширилась до поверхні головки (рис. 1, в) [9]. В ямках зламу, в цьому випадку, виявленні місця з численними оксидами алюмінію, кремнію, кальцію розміром 1 мкм (рис. 10), що є

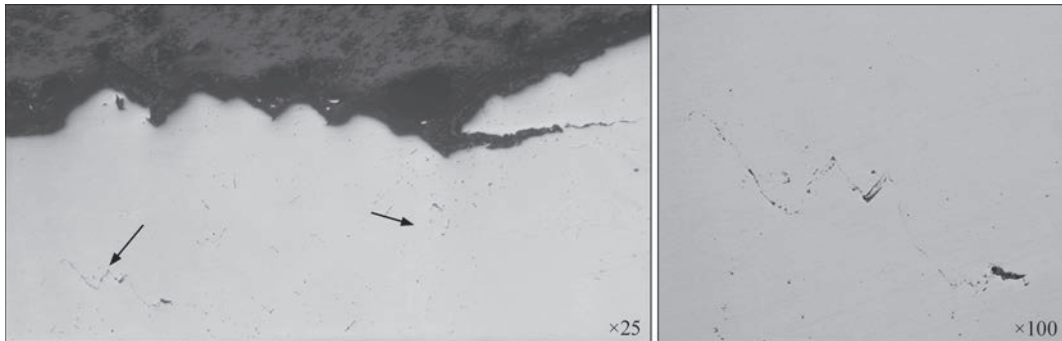


Рис. 8. Неметалічні включення в металі рейки, що примикає до ОП

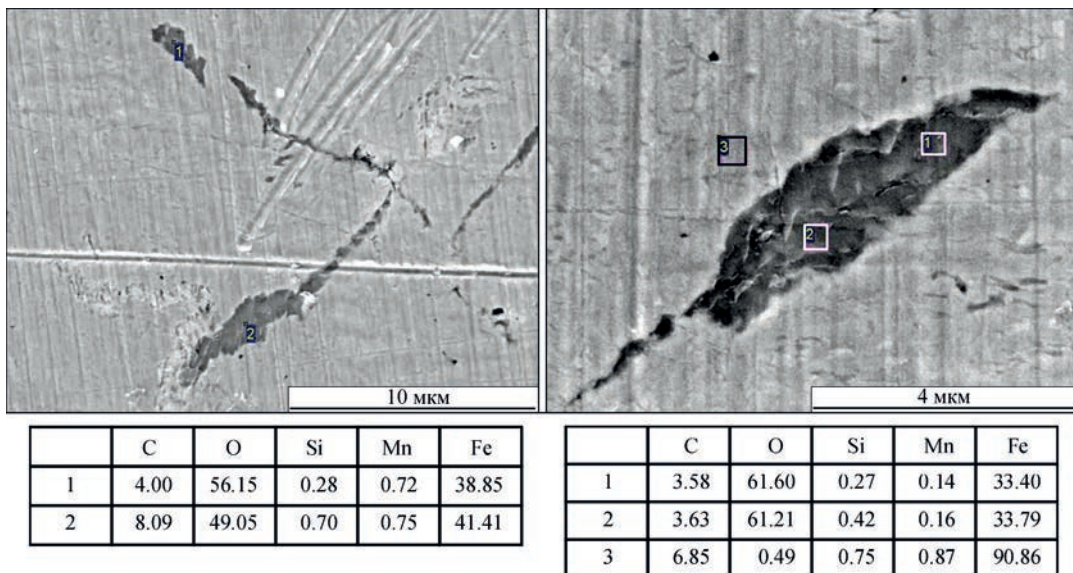
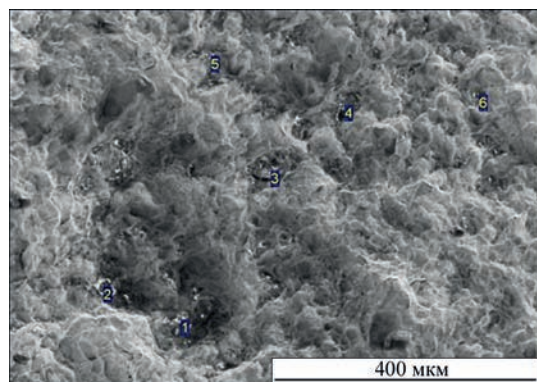
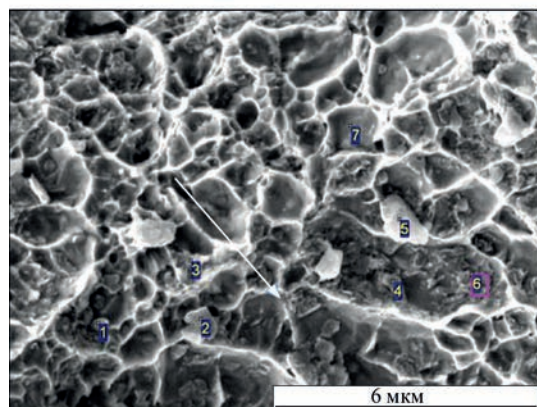


Рис. 9. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу неметалевих включень (ат. %) в металі рейки, що примикає до ОП



	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
1	34.38	7.29		0.68	3.60		4.58	45.64
2	46.57	29.02		1.47	4.41	1.53		2.40
3	24.0	23.21		1.49	3.27		0.74	47.29
4	49.32	33.95	0.23	1.87	6.48	0.30	0.79	6.03
5	55.94	27.26	0.45	2.35	6.54		1.18	5.57
6	26.55	53.09	0.36	1.25	2.61	2.41	10.22	1.86

а



	C	O	Al	Si	S	Ca	Fe
1	16.48	3.78	0	1.02			78.62
2	28.58	19.54	0	1.03	1.46	2.14	46.66
3	16.05	9.34	0.67	1.48			72.46
4	18.36	24.75	3.20	5.00			48.69
5	18.83	52.32	5.01	15.22			4.75
6	17.46	4.58	0.31	0.57			77.07
7	3.52	0.17	0	0.40			95.92

б

Рис. 10. Поверхня зламу та результати рентгенівського мікроаналізу (ат. %) хімічної неоднорідності на ділянці ОП при руйнуванні стика на відстані 7 мм від лінії з'єднання

підтвердженням участі цих оксидів у формуванні оксидної плівки.

Необхідно відзначити відмінність ОП від відомих «матових плям» [9], що спостерігаються на поверхні зламів з'єднань рейок КФ76. «Матові плями» є результатом взаємодії в приконтактному шарі скупчень кремнієвмісних оксидних включень з поверхнево активним в залізі марганцем і подальшим утворенням силікатних плівок [10]. Відомо [11], що оксидні плівки негативно впливають на властивості сталі. Так в роботі [12] відмічається зниження відносного звуження металу рейкової сталі з недостатнім ступенем розкислення. Наявність ОП на поверхні зламу при випробуваннях на статичний згин є свідченням недостатнього ступеня розкислення і фактором зниження якості сталі.

## Висновки

1. Згідно з даними мікрорентгеноспектрального аналізу поверхні зламів зварних стиків рейок К76Ф, поряд із характерними для конверторної рейкової сталі включеннями складних оксидів алюмінію, кремнію, кальцію в металі спостерігаються численні оксиди заліза, які розташовуються переважно по границях зерен. Наявність значної кількості оксидів заліза пов'язана з недостатнім ступенем розкислення рейкової сталі.

2. Руйнування рейок К76Ф по плівках оксидів заліза при випробуваннях на статичний згин є оз-

накою недостатнього ступеню розкислення сталі та імовірною причиною зниження експлуатаційних характеристик рейок та їх зварних стиків.

## Список літератури

1. Ботштейн В.А., Рудюк А.С., Чичкарев Е.А. и др. (2013) Освоение производства конвертерной рельсовой стали в ПАО МК «Азовсталь». *Металл и литье Украины*, 6 (241), 34–37.
2. (2016) ТУ У 27.1-40075815-002:2016. *Рейки нові зварені для залізниць*.
3. Кучук-Яценко С.І., Дідковський О.В., Богорський М.В. та ін. (2002) *Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням*. Україна Пат. 46820
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*, 4 (528), 40–48.
5. Самойлович Ю.А. (1983) *Системний аналіз кристалізації слитка*. Київ, Наукова думка.
6. Барабаш О.М., Коваль Ю.Н. (1986) *Кристаллическая структура металлов и сплавов*. Справочник. Київ, Наукова думка.
7. (1985) *Атлас шлаков*: Справ. изд. Пер. с нем. под ред. И.С. Куликова. Москва, Металлургия.
8. Левченко Н.В. (2006) Изменение неметаллических включений в процессе производства рельсов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2, 63–65.
9. Кучук-Яценко С.І., Швець В.І., Дідковський А.В. и др. (2016) Влияние неметаллических включений рельсовой стали на формирование сварного соединения. *Автоматическая сварка*, 5–6, 28–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.06.04>
10. Швець В.І., Зяхор І.В., Капітанчук Л.М. (2023) Особливості формування та трансформації оксидів при контактному-стиковому зварюванні рейок. *Автоматичне зварювання*, 7, 16–30. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.07.01>
11. Губенко С.І. (2015) *Неметаллические включения и прочность сталей*. Palmarium Academic Publishing.

12. Троцан А.И., Каверинский В.В., Кошуле И.М., Носоченко А.О. (2013) О факторах, влияющих на качество рельсовой стали и рельсов. *Металл и литье Украины*, 241 (6), 9–14.

## References

1. Botshtein, V. A., Rudyuk, A. S., Chichkarev, E.A. et al. (2013) Mastering of converter rail steel production at PJSC MK Azovstal, *Metall i Lityo Ukrainy*, 241(6), 34–37.
2. (2016) TU U 27.1-40075815-002:2016: *Rails are new welded for railways*.
3. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Bogorsky, M.V. et al. (2002) *Method of flash-butt welding*. Pat. 46820 Ukraine, 6 B23K11/04, C2. Publ. 06/17/2002 [in Ukrainian].
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Ye.V. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails, mining – informatics. *Automation and Electrical Eng.*, 528(4), 40–48.
5. Samoilovich, Yu.A. (1983) *System analysis of ingot crystallization*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Barabash, O.M., Koval, Yu.N. (1986) *Crystal structure of metals and alloys*: Reference. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
7. (1985) *Atlas of slags*: Reference. Ed. by I.S. Kulikova. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Levchenko, N.V. (2006) Variation of non-metallic inclusions during rail production. *Metallurgical and Mining Industry*, 2, 63–65.
9. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V. et al. (2016) The influence of non-metallic inclusions of rail steel on the formation of a welded joint. *The Paton Welding J.*, 5–6, 28–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>
10. Shvets, V.I., Ziakhor, I.V., Kapitanchuk, L.M. (2023) Features of formation and transformation of oxides in flash-butt welding of K76F rails. *The Paton Welding J.*, 7, 16–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.07.02>
11. Gubenko, S.I. (2015) *Nonmetallic inclusions and strength of steels*. Palmarium Academic Publ.
12. Trotsan, A.I., Kaverinsky, V.V., Koshule, I.M., Nosochenko, A.O. (2013) On the factors influencing the quality of rail steel and rails. *Metall i Lityo Ukrainy*, 241(6), 9–14.

## PECULIARITIES OF FRACTURE OF WELDED JOINTS OF RAILWAY RAILS OF OXYGEN-CONVERTER K76F STEEL

V.I. Shvets I.V., Ziakhor, L.M. Kapitanchuk, O.V. Didkovsky, E.V. Antipin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

The fracture surface of rail K76F steel after static bending tests of rail butt joints produced by flash-butt welding was studied. Butt joints of rails of individual batches were fractured on the base metal or heat-affected-zone. It is shown that in the regions of dark color and oval shape, the destruction of the iron oxide film takes place. The formation of films occurs as a result of flashing and spreading of iron oxide inclusions along the structural boundaries probably in the thermo-deformation conditions of the crimping shop at the stage of blooming production. The formation of clusters of iron oxides occurs during the crystallization of the residual melt in steel ingots with an insufficient degree of deoxidation. Oval regions of dark color on the surface of the fracture are evidence of an insufficient degree of deoxidation of rail steel and a factor of its quality reduction. Ref.12, Tabl.1, Fig. 10

*Key words: rail K76F steel, deoxidation, flash-butt welding, iron oxide*

Отримано 07.03.2024

Отримано у переглянутому вигляді 09.04.2024

Прийнято 24.05.2024

## ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Костя Траченко, який здобув ступінь доктора наук у Кембриджському університеті та магістра у Львівському, розробив нову теорію, яка вирішує давню проблему фізики — передбачення температури плавлення матеріалів. Його дослідження, опубліковане в журналі *Physical Review E*, є значущим кроком у розумінні фундаментальних властивостей матерії і фазових переходів. Протягом десятиліть учені стикалися з проблемою відсутності універсального опису лінії плавлення на фазових діаграмах температура-тиск. Але тепер теорія професора Траченка, заснована на останніх досягненнях у теорії

рідин, пропонує просте параболічне рівняння для опису цієї лінії. Це означає, що температуру плавлення можна передбачити з використанням фундаментальних фізичних констант. «Простота й універсальність цього результату особливо цікаві», — пояснює професор Траченко. «Це передбачає, що плавлення, незважаючи на його складність, демонструє фундаментальну єдність різних систем, від благородних газів до металів». Робота Траченка отримала 10 найкращих нагород за прорив у фізиці та премію EPSRC-CCP за «видатний внесок у теорію і моделювання фаз конденсованої речовини, включно з теорією рідкого стану».

рідин, пропонує просте параболічне рівняння для опису цієї лінії. Це означає, що температуру плавлення можна передбачити з використанням фундаментальних фізичних констант. «Простота й універсальність цього результату особливо цікаві», — пояснює професор Траченко. «Це передбачає, що плавлення, незважаючи на його складність, демонструє фундаментальну єдність різних систем, від благородних газів до металів». Робота Траченка отримала 10 найкращих нагород за прорив у фізиці та премію EPSRC-CCP за «видатний внесок у теорію і моделювання фаз конденсованої речовини, включно з теорією рідкого стану».

*Theory of Liquids. From Excitations to Thermodynamics*

Kostya Trachenko

Queen Mary University of London

2023, 300 стор., ISBN: 9781009355476

