

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОЯВИ ДЕФЕКТІВ В ЗВАРНИХ СТИКАХ ТРАМВАЙНИХ РЕЙОК, ВИКОНАНИХ ТЕРМІТНИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Е. Турик¹, І.О. Рябцев², М. Ломозік¹, К. Красновський¹

¹Дослідницька мережа Лукасевич – Інститут зварювання, 44-100, м. Глівіце, вул. Бл. Чеслава 16-18, Польща.
E-mail: is@is.gliwice.pl

²ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлені результати досліджень причин втомного руйнування стиків рейок двох нових трамвайних колій, виконаних термітним зварюванням двома організаціями. Проведено контрольний аналіз хімічного складу і механічних властивостей матеріалу рейок; аналіз хімічного складу швів; макро- та мікроскопічні дослідження зварного шва, ЗТВ і основного металу; дослідження твердості в цих зонах. Встановлено, що потенційною причиною появи тріщин є скупчення пор і поодинокі мікротріщини в металі зварних швів. Визначено порушення технологічного процесу термітного зварювання трамвайних рейок, що призводять до утворення цих дефектів. Виявлені дефекти є результатом наступних факторів, пов'язаних з невиконанням вимог стандарту по термітному зварюванню трамвайних рейок і системи забезпечення якості зварювальних робіт: порушеннями технології зварювання і недостатнім контролем на відповідних етапах виробничого процесу. Бібліогр. 12, рис. 7.

Ключові слова: термітне зварювання, трамвайні рейки, втомні тріщини, пористість, мікротріщини, система забезпечення якості

Вимоги до термітного зварювання рейок на трамвайних маршрутах і атестацію процедури термітного зварювання трамвайних рейок регулює Європейський стандарт PN-EN 16771:2017-01 [1], а вимоги до хімічного складу металу термітних зварних швів наведені в стандарті PN-EN 14730-1:2017-06 [2]. Додатково рекомендується, щоб виконавець робіт дотримувався вимог до якості виконання зварювання по стандарту EN ISO 3834-2 [3]. При дотриманні цих вимог забезпечується належна якість стиків і їх довговічність, що підтверджує багаторічний досвід експлуатації безстикових рейкових шляхів, які виконано термітним зварюванням.

Останнім часом у Польщі виникла проблема втомного руйнування стиків рейок нових трамвайних колій, виконаних термітним зварюванням, що підтверджується публікаціями на різних сайтах. У даній статті розглянуто два випадки поломки рейок на трамвайних лініях, побудованих двома організаціями. На трамвайному маршруті «А» після трьох місяців експлуатації були виявлені тріщини

втомного типу в зварних стиках жолобчастих рейок 60R2 (Тв-60) зі сталі R260, виконаних термітним зварюванням першою організацією. На одній ділянці трамвайного маршруту з приблизно 1000 зварних стиків зруйнувалися 32. На трамвайному маршруті «Б» аналогічні тріщини були виявлені в 90 зварних стиках з 150. Термітне зварювання стиків рейок на цьому маршруті виконувала друга організація.

Тріщини, які призвели до руйнування рейок, спочатку поширювалися поперек зварного стику приблизно на половині висоти шийки рейки (рис. 1, а). Довжина тріщин сягала 20 см. Потім тріщини змінювали напрямок на 90° в сторону головки і підшви рейки і відбувалося повне руйнування стику (рис. 1, б).

Метою цієї роботи було визначення дефектів зварювання, які можуть бути причиною появи втомних тріщин в зварних стиках трамвайних рейок і визначення технологічних операцій, в яких, імовірно, відбулося порушення режимів термітного зварювання.

Дослідження причин появи тріщин в зварних стиках трамвайного маршруту «А». Було узгодже-

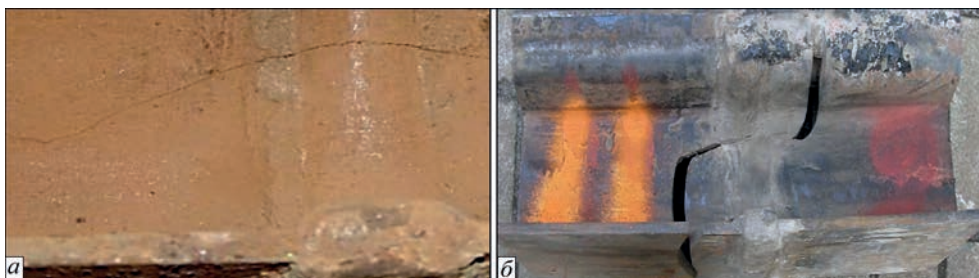


Рис. 1. Первісна тріщина (а) і характер руйнування трамвайних рейок в зоні зварного стику (б)

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>

© Е. Турик, І.О. Рябцев, М. Ломозік, К. Красновський, 2021

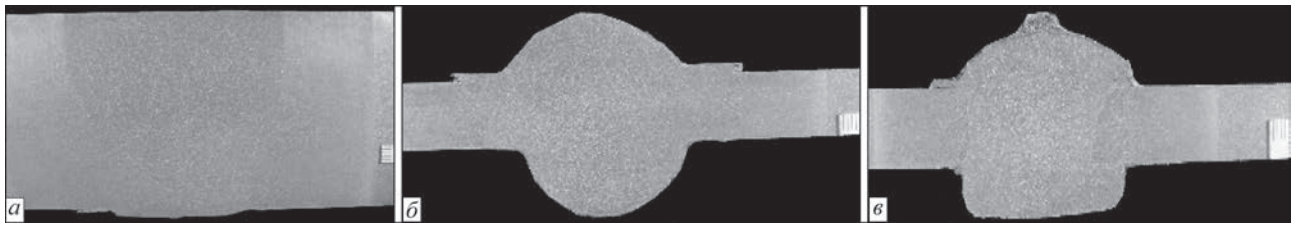


Рис. 2. Макроструктура зварного стику в зоні головки (а), шийки (б) і підшви (в) рейок

но наступний обсяг випробувань для визначення дефектів зварювання, які можуть бути потенційною причиною появи втомних тріщин в двох зварних стиках С1 і С2 рейок маршруту «А»:

- контрольний аналіз хімічного складу і механічних властивостей матеріалу рейок – зварні стики № С1 (рейки № 1 і 2) і № С2 (рейки № 3 і 4);
- контрольний аналіз хімічного складу зварних швів, які виконано термітним зварюванням;
- металографічні дослідження і дослідження розподілу твердості зварного шва, ЗТВ і основного металу;
- металографічні дослідження і дослідження розподілу твердості поза зоною руйнування в області підшви і головки рейок.

Аналіз хімічного складу матеріалу рейок №№ 1–4 проводили на оптико-емісійному спек-

трометрі Q4 Tasman фірми BRUKER. Встановлено, що хімічний склад матеріалу рейок відповідає вимогам стандарту EN 14811:2019 [4]. Міцність на розтяг $\sigma_B = 911,3 \dots 991,6$ МПа і відносне подовження $\delta_5 = 13,0 \dots 16,3$ % матеріалу рейок № 1–4 також відповідають вимогам стандарту для сталі R260: $\sigma_B \geq 880$ МПа, $\delta_5 \geq 10$ %. Аналіз хімічного складу зварних стиків С1 і С2, виконаних термітним способом, показав, що вміст легуючих елементів в швах також відповідає вимогам стандарту PN-EN 14730-1:2017-06 [2]. Дослідження макроструктури зварних з'єднань в зоні головки, шийки і підшви рейок не виявили дефектів зварювання у вигляді несплавлень, непроварів і шлакових включень (рис. 2, а–в).

Однак в зварних стиках С1 і С2 в зоні руйнування виявлені скупчення дрібних пор (рис. 3).

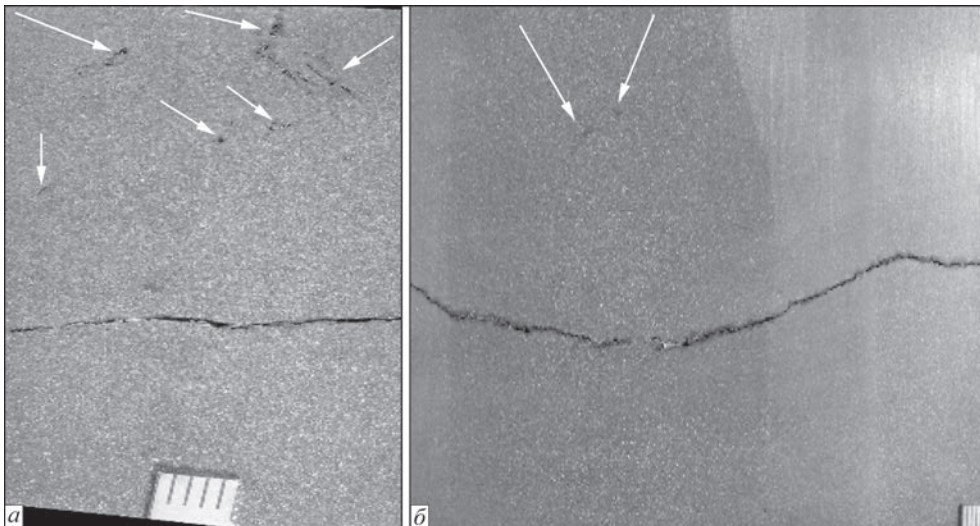


Рис. 3. Макроструктура зварних стиків С1 (а) і С2 (б) в зоні тріщини (стрілками позначені скупчення газових пор)

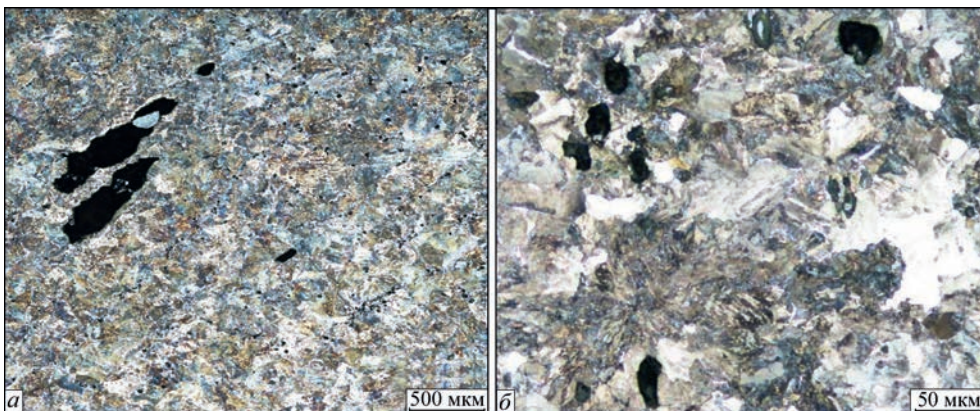


Рис. 4. Мікроструктура зварних стиків С1 (а) і С2 (б) в зоні тріщини. Пори в зварних швах.

Пористість зварних швів була підтверджена мікроскопічними дослідженнями (рис. 4). Причиною утворення пор є зменшення розчинності газів при зниженні температури. Якщо охолодження зварного стику йде занадто швидко, зростає ймо-

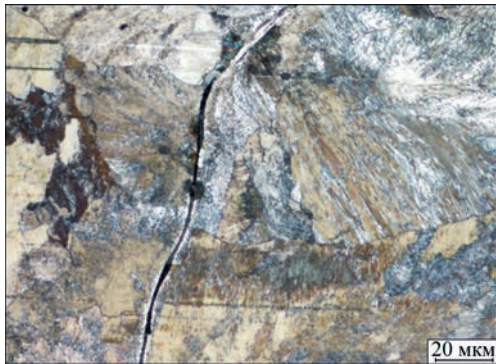


Рис. 5. Мікроструктура зварного шва стику С1 в зоні тріщини

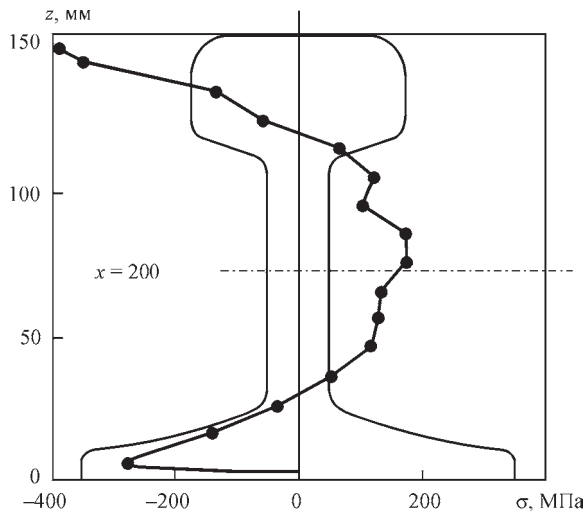


Рис. 6. Розподіл залишкових напружень в стику рейок, виконаному термітним зварюванням [5]

вірність того, що бульбашки газів не встигнуть спливи і утворюються пори.

Дослідження мікроструктури показали, що матеріал рейок має перлітно-бейнітну структуру з невеликою кількістю фериту. Несприятливої мартенситної структури в ЗТВ не виявлено. Дослідження твердості підтвердило цей факт – твердість ЗТВ не перевищувала $HV\ 325$.

У зварному шві з'єднання С1 на ділянці шийки рейки виявлені одиничні мікротріщини по межах зерен, що виникають на значній відстані від магістральної тріщини (рис. 5).

Мікротріщини, мабуть, є результатом впливу розтягуючих напружень, які викликають пластичну деформацію металу шва. Виникненню мікротріщин сприяє поява на межах зерен рідких плівок легкоплавких евтектик, що мають температуру затвердіння набагато нижче за температури затвердіння заліза.

Газові пори і мікротріщини в зварних стиках С1 і С2 трамвайного маршруту «А» сприяють виникненню втомних тріщин, які утворилися в шийці рейок, в зоні найвищих залишкових напружень розтягу (рис. 6).

Дослідження причин появи тріщин в зварних стиках трамвайного маршруту «Б». Предметом дослідження служили два зруйнованих стика № I та № II трамвайних рейок 60R2, виконаних методом SRZ [6]. Випробування механічних властивостей показали, що матеріал рейок не відповідає вимогам PN-EN 14811:2019-06 щодо мінімального подовження для сталі R260, а межа міцності, межа плинності і відносне подовження значно відрізняються від даних в акті за результатами приймальних випробувань 3.1 по EN 10204:2017 [7].

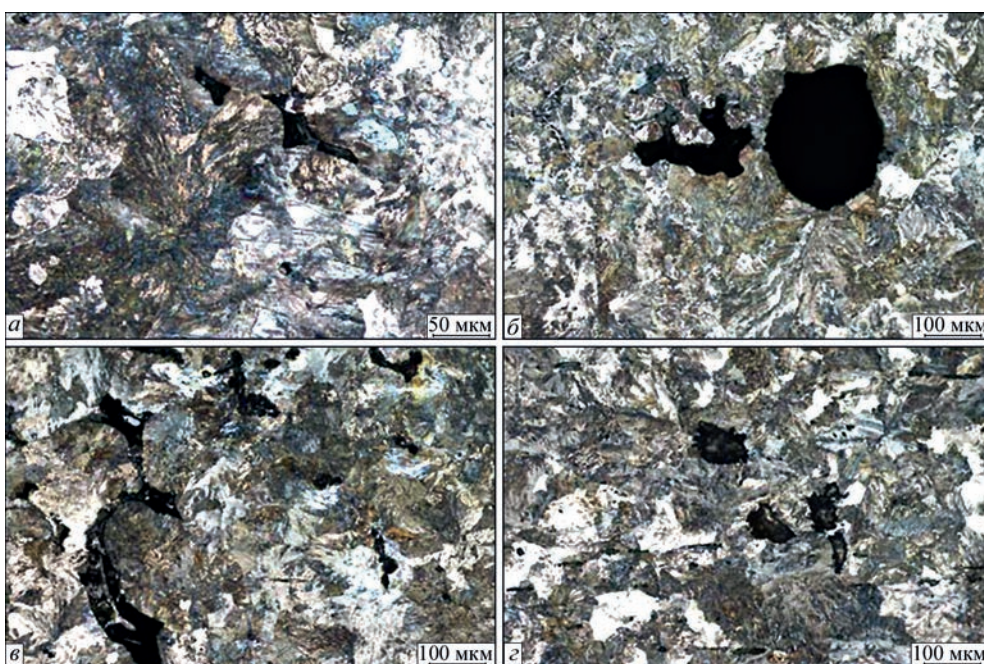


Рис. 7. Газові пори в голівці (а, в) та підшві (б, г) рейок зварних стиків I і II, відповідно

Використання неякісного матеріалу рейок зі зниженими пластичними властивостями свідчить про недостатній контроль перед зварюванням, що не відповідає вимогам EN ISO 3834-2:2019, п. 14.2.

Недостатній контроль перед зварюванням підтверджує також відсутність сертифікатів кваліфікації зварників термітного зварювання трамвайних рейок методом SRZ. Були представлені сертифікати по PN-EN 14730-2:2006 [8] кваліфікації зварників термітного зварювання залізничних рейок методом зварювання SoWoS [9, 10] без посилення, з верхнім підігрівом решт рейок і методом SkV [11, 12] з коротким часом підігріву. Це не відповідає вимогам EN ISO 3834-2:2019, п. 7.2.

Металографічними дослідженнями виявлені скупчення пор в зварних швах стиків I і II в області головки і підшви рейок (рис. 7).

В результаті досліджень встановлено ймовірні причини передчасного втомного руйнування зварних стиків рейок трамвайного маршруту «Б»:

а) використання матеріалу рейок, яке не відповідає технічним вимогам стандартів, зі зниженими пластичними властивостями;

б) порушення технології термітного зварювання, внаслідок яких в металі зварних швів рейок виявлено мікротріщини і скупчення газових пор в їх зоні;

в) недостатній технічний нагляд за технологією термітного зварювання рейок, про що свідчать:

– неповні операційні карти зварювання WPS (не вказані температура і час попереднього підігріву, висота пальника над головкою рейки, час від закінчення заливки термітного розплаву в форму до обрубки обливу з верхньої частини головки рейки і по радіусним частинам);

– відсутність сертифікатів кваліфікації зварників термітного зварювання трамвайних рейок методом SRZ.

Висновки

1. У металі зварних стиків рейок C1 і C2 маршруту «А» виявлено дефекти зварювання у вигляді скупчень газових пор, які утворюються внаслідок занадто швидкого охолодження металу шва. Пористість виявлена також в зварних стиках I і II рейок маршруту «Б».

2. У зварному стику C1 маршруту «А» на ділянці шийки рейки виявлені недопустимі дефекти зварювання у вигляді поодиноких мікротріщин по межах зерен.

3. Поява газових пор і мікротріщин пов'язана з наступними порушеннями технологічного процесу термітного зварювання трамвайних рейок:

– низька температура і короткий час попереднього підігріву кінців рейок;

– нерівномірний нагрів зварювальних кінців рейок;

– занижений рекомендований технологією зазор між кінцями рейок перед зварюванням;

– швидке охолодження металу зварного шва через передчасне зняття формуючого пристрою (занадто короткий час від випуску металу з тигля до зняття формуючого пристрою).

4. Виявлені дефекти є результатом двох факторів, пов'язаних з невиконанням виконавцями вимог стандарту по термітному зварюванню трамвайних рейок і системи забезпечення якості зварювальних робіт:

– порушеннями технології зварювання;

– недостатнім контролем на відповідних етапах виробничого процесу: неповні операційні карти зварювання WPS, відсутність сертифікатів кваліфікації зварників термітного зварювання трамвайних рейок методом SRZ, а в разі трамвайного маршруту «Б» також матеріал рейок, що не відповідає специфікації.

5. Виявлені дефекти зварювання (газові пори і мікротріщини) є потенційною причиною появи втомних тріщин зварних з'єднань трамвайних рейок в процесі експлуатації.

Список літератури/References

1. PN-EN 16771:2017-01 *Railway applications – Infrastructure – Aluminothermic welding of grooved rails.*
2. PN-EN 14730-1:2017-06 *Railway applications – Track – Aluminothermic welding of rails. Part 1: Approval of welding processes.*
3. ДСТУ EN ISO 3834-2:2019 *Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 2. Всебічні вимоги до якості.*
4. PN-EN 14811:2019-06 *Railway applications. Track. Special purpose rail. Grooved rails and associated construction profiles.*
5. Lawrence F.V., Chen Y-R., Cyre J.P. *Improving the fatigue resistance of thermite railroad rail weldments.* <http://fc.mechse.illinois.edu/files/2014/07/Lawrence-presentation.pdf>
6. *Thermit SRZ/SRZ L50/SRE welding process for grooved rails.* https://www.elektro-thermit.de/fileadmin/et/user_upload/PDF/Produktbrosch%C3%BCren/SRZ_SRE_DEF.pdf
7. ДСТУ EN 10204:2017 *Вироби металеві. Види документів контролю.*
8. PN-EN 14730-2:2006 *Railway applications – Track – Aluminothermic welding of rails. Part 2: Qualification of aluminothermic welders, approval of contractors and acceptance of welds.*
9. (2010) *Code of Practice for the THERMIT – Quick Welding Procedure SoWoS.* Elektro-Thermit GmbH & Co KG.
10. (2019) *Instrukcja spawania szyn termitem Id-5.* PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
11. *Code of Practice for the THERMIT – Quick Welding Procedure SkV.* Elektro-Thermit GmbH & Co KG, 2010. https://www.thermit.com.au/media-centre/technical-information/PI_8.5.1-296_TA_TS-Code-of-Practice-SkV-Elite-Welding-Procedure.pdf.
12. Электро-Термит. *Технология алюминотермитной сварки рельсов с коротким временем подогрева (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75).* <https://docplayer.com/27763010-Elektro-thermit-tehnologiya-alyuminotermiitnoy-svarki-relov-s-korotkim-vremenem-podogreva-skv-skv-l-50-skv-l-75.html>. Elektro-Thermit. *Technology of aluminothermic welding of rails with short time of heating (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75).*

INVESTIGATION OF THE CAUSES FOR APPEARANCE OF DEFECTS IN WELDED BUTT JOINTS OF TRAM RAILS MADE BY THERMIT WELDING

E. Turik¹, I.O. Ryabtsev², M. Lomozik¹, K. Krasnovskiy¹

¹Lucasiewicz Research Network – Institute of Welding, 44-100, Gliwice, 16-18 Bl. Czeslava, Poland. E-mail: is@is.gliwice.pl

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The results of investigations of the causes for fatigue fracture of rail butt joints on two new tram tracks, made by thermit welding by two organizations are presented. Control analysis of the chemical composition and mechanical properties of the rail material; analysis of the chemical composition of the welds; macroscopic and microscopic investigations of the weld, HAZ and base metal; and hardness studies in these zones were performed. It was found that pore accumulation and isolated microcracks in the weld metal are the potential cause for cracking. Violations of the technological process of thermit welding of the tram tracks were determined, which lead to appearance of these defects. The detected defects are the result of the following factors, associated with failure to meet the standard requirements on thermit welding of tram tracks and of the system of ensuring the quality of welding operations, namely violation of welding technology and insufficient control at the respective stages of the production process. 12 Ref., 7 Fig.

Keywords: thermit welding, tram tracks, fatigue cracks, porosity, microcracks, quality assurance system

Надійшла до редакції 16.09.2021

VI Міжнародна конференція

ТИТАН 2022: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

30 травня – 1 червня 2022 р.

Голова програмного комітету
академік С.В. Ахонін



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Національний університет «Запорізька політехніка»
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Деформаційна обробка титану
- Виробництво та використання порошків титану
- Структура та властивості титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

Контрольні дати

Надання заявок на участь в конференції та тез доповідей до 12.05.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі до 19.05.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску до 30.05.2022 р.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
вул. Казимира Малевича, 11,
м. Київ, 03150, Україна
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2022

Інформаційна підтримка:
«Сучасна електрометалургія»
«Автоматичне зварювання»
«Biuletyn Instytutu Spawalnictwa»



Нова книга



Електронно-лучева сварка. Технології. Обладнання. Матеріали: Сб. статей под ред. чл.-кор. НАН України В.М. Нестеренкова. — Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, 2021. — 390 с.

Сборник включает 38 статей сотрудников отдела «Физические процессы, техника и оборудование для электронно-лучевой и лазерной сварки» Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 2011–2020 гг. В нем обобщен опыт научно-исследовательской и инженерной деятельности отдела в области электронно-лучевой сварки. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами соединения металлов с помощью высококонцентрированных источников нагрева, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы электронно-лучевой сварки и родственных процессов.