

ВИКОРИСТАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ЗВАРНИХ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРОГНОЗНИХ ЯКОСТЕЙ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко, І.Г. Волошкевич

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: st_private@hotmail.com, inpat59@ukr.net

Результати випробувань зразків показують високу чутливість методу акустичної емісії до якості зварного з'єднання. Цей факт може бути використаний для прогнозування руйнівного навантаження та границі міцності, яке автоматично виконується системами акустико-емісійної діагностики ЕМА. Показано, як за допомогою випробувань зварних зразків із заздалегідь невідомими показниками міцності можна перевірити прогноз руйнівного навантаження та границі міцності, який виконується за даними акустичної емісії. Отримані результати свідчать, що такий прогноз є успішним і не потребує додаткового коригування попередньо визначених налаштувань системи. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: зварний шов, акустична емісія, руйнування матеріалів, навантаження, границя міцності, прогноз

Вступ. Зварні з'єднання часто містять дефекти, які виникають як внаслідок порушення технології зварювання, так і завдяки дії залишкових напружень [1, 2]. Тому область зварного з'єднання потребує першочергового контролю при проведенні технічного діагностування. При випробуваннях зразків, які містять зварні з'єднання, спостерігається, як правило, значно більша кількість подій акустичної емісії (АЕ), ніж при випробуваннях зразків без зварних з'єднань [3]. Автори показали, що фактично картина виникнення та розподілу в часі та просторі подій АЕ пов'язана з розвитком пошкодженості матеріалу у відповідний період часу та на відповідних ділянках матеріалу [4]. Наразі визначення поточного стану матеріалу конструкцій (Structural health monitoring) знаходить у світі все більший розвиток. Але, незважаючи на активацію подібних досліджень [5–12], їх основним недоліком є відсутність чітко нормованої оцінки пошкодженості, прогнозу руйнування, точності та вірогідності отриманих результатів.

Мета роботи – перевірка якості алгоритмів прогнозування руйнування, закладених у програмне забезпечення систем типу ЕМА [1, 3, 4], на зварних зразках із різними типами з'єднань в умовах, коли реальне руйнівне навантаження і, відповідно, границі міцності зразка заздалегідь невідомі. Незважаючи на те, що розроблено спеціальні методики перевірки прогнозуючих АЕ систем, завдання, поставлене у роботі, – показати, що впевнитись у якості прогнозних характеристик систем типу ЕМА можна, тільки провівши серію простих випробувань зразків.

Об'єкт досліджень. Для вирішення поставлених завдань було проведено ряд випробувань

зразків з матеріалу труб зі сталі 17ГС (границя міцності 450...500 МПа) з поперечним розрізом, зварених по місцю розрізу, із заздалегідь невідомими характеристиками міцності металу шва. Зварні з'єднання виконано ручним дуговим зварюванням електродами УОНИ-13 діаметром 3 мм. Використовували стандартні зразки для АЕ випробувань (рис. 1, а) зі зменшеною до 0,8 см² площею перерізу в середній частині. Для руйнування зразків використовували розривну машину Р-20 з гідравлічним приводом (рис. 1, б).

Методика випробувань. При випробуваннях використовували АЕ систему ЕМА-3. Антену з чотирьох перетворювачів акустичної емісії (датчиків) розташовували на зразку за лінійною схемою (рис. 1). Обробку даних виконували з використанням сучасної програми ЕМА-3.92. Відстань між центрами датчиків становила 110 мм, контрольована зона – 140 мм (по 70 мм ліворуч і праворуч від центру зразка). Дані піддавали кластерному аналізу в процесі випробувань і при подальшій обробці. Події АЕ, що пройшли відбракування за координатною ознакою, об'єднували у кластери. Для коректного виконання прогнозу радіус кластера встановлювали рівним розміру контрольованої зони (140 мм), що дозволяло аналізувати дані АЕ зі встановленої зони як такі, що описують процес руйнування в цілому, а також відстежувати зсув центра локалізації АЕ по довжині зразка в межах цієї зони. Сигнали АЕ реєстрували в діапазоні 100...1000 кГц.

Результати дослідження. Найтипівіші результати випробувань представлені у вигляді діаграм випробувань (рис. 2–6) і показників індикаторів програми ЕМА-3.92 з результатами прогнозу руйнівного навантаження та границі міцності.

Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Бойчук О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>, Волошкевич І.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-1419-9500>
© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко, І.Г. Волошкевич, 2024

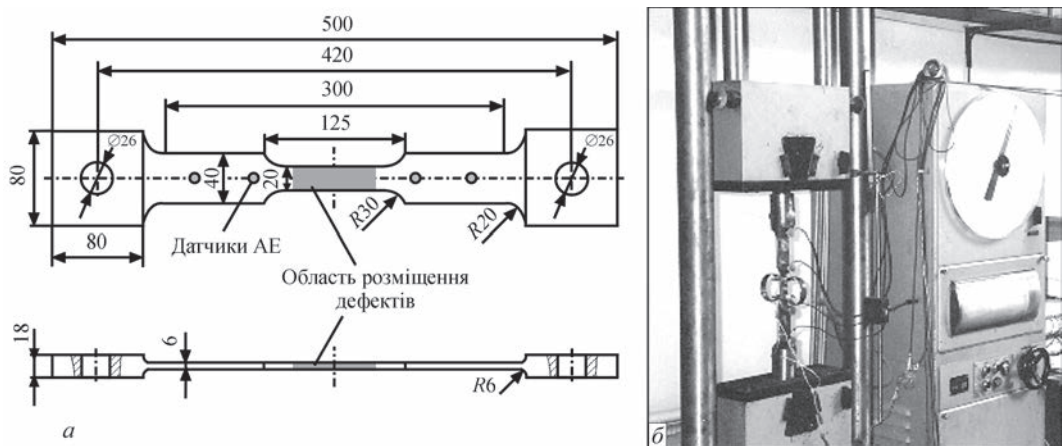


Рис. 1. Зразок і розривна машина для проведення випробувань із застосуванням АЕ технології: а – креслення; б – розташування зразка у захватах розривної машини Р-20

На діаграмах лініями синього кольору відображено стовпчастий графік амплітуд подій АЕ (А, дБ); червоного – лінійний графік навантаження на зразок (Р, кг); зеленого – точковий графік параметру «Райс тайм» (Rt, мкс), який характеризує час наростання сигналу до максимуму; фіолетового – лінійний графік сумарного числа подій АЕ (N, безрозмірний). По осі абсцис відкладено час (t, с), що минув від початку випробування.

На рисунках наведено типові результати випробувань на прикладі чотирьох зразків (№ 1–4) зі зварним швом та одного (№ 5) зі зварною точкою. Результати кінцевого прогнозування руйнування для п'яти зразків, зробленого на момент надання АЕ системою попередження № 3 «Небезпека», наведено в табл. 1, а дані першого під час випробувань коректного прогнозу для всіх випробуваних зразків – у табл. 2.

Проведені раніше випробування зразків із різними типами зварних з'єднань, якість виконання зварювання яких чітко контролювалася [3], показали, що руйнівне навантаження коливалося у межах від

26 кН (2600 кг) до 95 кН (7000...9500 кг). У виконаній серії випробувань спостерігали значно менші руйнівні навантаження, що відповідають меншій границі міцності матеріалу зварного з'єднання, а також такі, що відповідають міцності даної марки матеріалу. Виняток складають зразок зі зварним швом № 2 і зразок зі зварною точкою № 3, для яких границя міцності відповідає значенням для сталі 17ГС.

Зазначимо, що сумарна кількість подій N для різних зразків відрізняється у кілька разів, максимальні амплітуди А, дБ – у 1,5 рази, час наростання сигналу АЕ до максимуму амплітуди Rt, мкс – більше ніж у 5 разів.

У табл. 2 наведено типові результати прогнозу руйнівного навантаження для зразків із з'єднаннями, що мають різні значення границі міцності. Номерами 1–4 позначені зразки зі зварним швом, номерами 5–8 – зразки зі зварною точкою. Відзначимо, що дані у табл. 2 не завжди відповідають наведеним у табл. 1 даним з індикаторів прогнозу програми ЕМА-3.92. Це пов'язано з тим, що для

Таблиця 1. Результати кінцевого прогнозування руйнування для зразків № 1–5

Номер зразка	Реальне руйнівне навантаження, кг	Прогнозне руйнівне навантаження, кг	Прогнозна границя міцності, МПа
1	1738	1573...1815	196,7...227,0
2	4620	3995...4935	499,7...617,3
3	1272	1222...1410	152,9...176,4
4	2025	1751...2163	219,0...270,6
5	1852	1750,3...2210	218,9...276,5

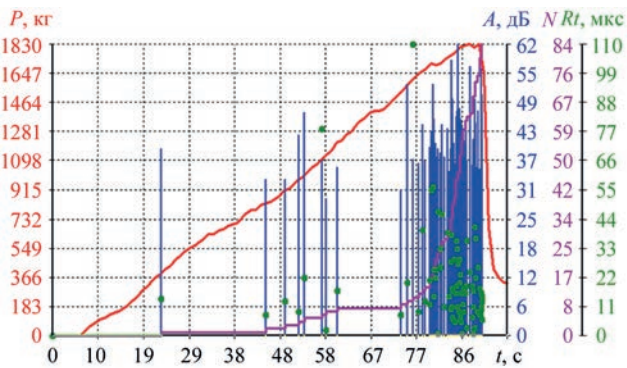


Рис. 2. Діаграми випробування зразка № 1 зі зварним швом

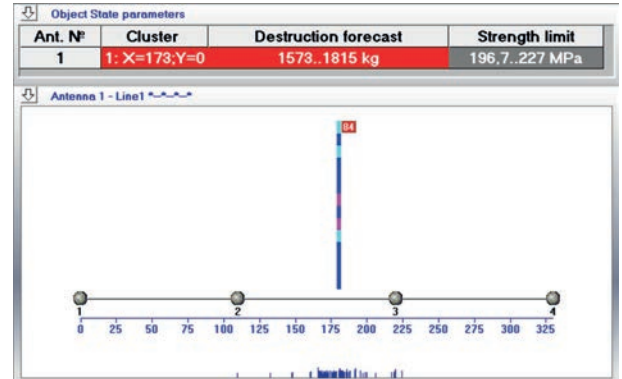


Рис. 3. Діаграми випробування зразка № 2 зі зварним швом

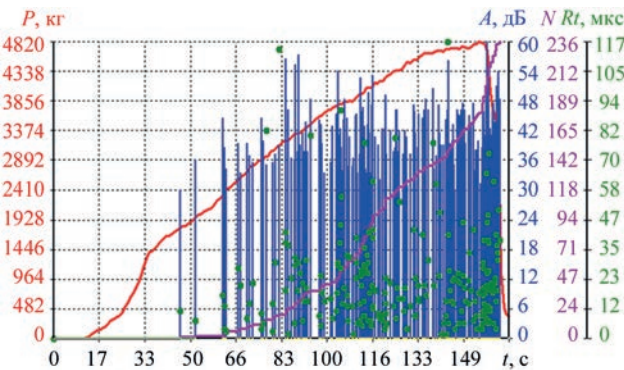


Рис. 4. Діаграми випробування зразка № 3 зі зварним швом

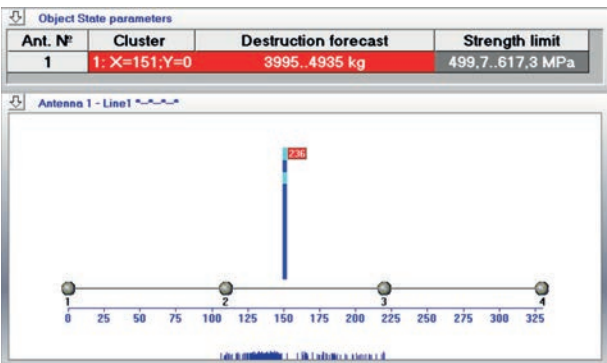


Рис. 5. Діаграми випробування зразка № 4 зі зварним швом

Таблиця 2. Детальні результати прогнозу руйнівного навантаження зварних зразків

Номер зразка	Час прогнозу руйнування, с	Час початку руйнування, с	Кількість подій АЕ, за якими виконано прогноз	Поточне навантаження, при якому надано прогноз, кг	Рівень попередження про небезпеку	Прогноз руйнування – нижня границя, кг	Прогноз руйнування – верхня границя, кг	Дійсне руйнівне навантаження, кг
1	57	91	7	1110	2	1587	2786	1738
2	68	155	8	2600	2	3718	6526	4620
3	59	64	8	900	2	1267	2259	1272
4	99	120	8	1260	2	1801	3162	2025
5	119	152	7	728	2	1041	1857	1852
6	119	183	7	2139	2	3058	5368	4091
7	143	155	147	4700	3	3995	4935	4820
8	112	148	19	1816	2	1841	2867	2751

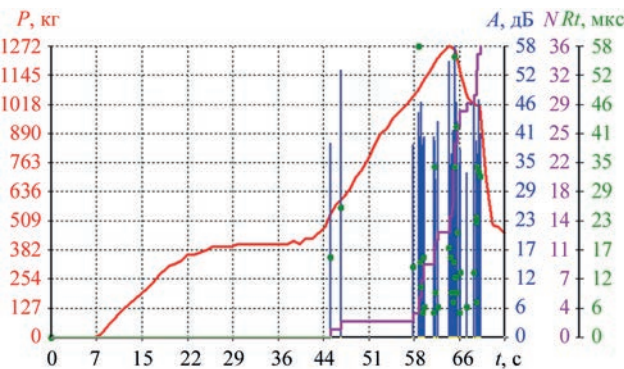


Рис. 6. Діаграми випробування зразка № 5 зі зварною точкою

більшості зразків коректний прогноз зроблено ще у момент генерації попередження № 2 «Підвищити увагу» і його результати не співпадають повністю з результатами кінцевого прогнозу, зробленого при попередженні № 3 «Небезпека». У відповідній колонці таблиці вказано, при якому саме рівні попередження зроблено прогноз.

З табл. 2 видно, що для випробуваних зразків реальне руйнівне навантаження попадає у діапазон прогнозування при генерації попередження № 3. Нижня та верхня границі прогнозу загалом вкладаються в допустиме для систем типу ЕМА відхилення $\pm 15\%$. Іноді, коли прогноз виконано при генерації попередження № 2, діапазон прогнозних значень виходить за рамки вказаних відсотків, але нижнє значення руйнівного навантаження є меншим, ніж реальне руйнівне, при цьому середнє значення руйнівного навантаження у даний діапазон вкладається. Дана похибка прогнозування не є кри-

тичною, оскільки попередження № 2 про небезпеку генерується програмою ЕМА-3.92 заздалегідь, задовго до досягнення границі міцності матеріалу, а при генерації попередження № 3 відповідний діапазон прогнозного руйнівного навантаження зву-жується до заданих границь відхилення $\pm 15\%$.

Зазначимо також, що найчастіше вірний про-гноз руйнування можна отримати в момент, коли залишається достатньо часу до руйнування зразка – від 57 % загальної тривалості випробування у найкращому випадку та до 8 % – у найгіршому.

Таким чином, навіть без внесення коректив у на-лаштування прогнозу системи типу ЕМА можуть за-безпечити своєчасне попередження про небезпеку руйнування зварних з'єднань, генерувати прогноз руйнівного навантаження та, відповідно, границі міцності із задовільною для практики точністю.

Висновки

1. Показано на зразках з невідомими характе-ристиками міцності, що прогноз, який виконується АЕ системами типу ЕМА, дає коректні результати.
2. Випробувано серію зразків зі зварними шва-ми та зварними точками. Їхнє руйнівне наванта-ження і, відповідно, границі міцності, були зазда-легідь невідомі та коливались у досить широких межах у залежності від якості зварного з'єднання.
3. Прогноз руйнівного навантаження для ви-пробуваних зразків дав задовільні показники. Роз-кид прогнозних значень для руйнівного наванта-ження, отриманий на момент попередження № 2, є, як правило, більшим, ніж під час попередження № 3, і не завжди вкладається у допустимі границі

відхилення $\pm 15\%$, але відповідає реальним показникам руйнування матеріалу. Розкид прогнозних значень під час попередження № 3 вкладається в допустимі межі відхилення.

4. Отримані результати свідчать, що перевірка прогнозних властивостей АЕ систем може бути виконана за спрощеною схемою, аналогічною тій, що використана у даній роботі.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: Учебное пособие. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
2. Щербинский В.Г., Феоктистов В.А., Полевик В.А. и др. (1987) *Методы дефектоскопии сварных соединений*. Москва, Машиностроение.
3. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. та ін. (2021) Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 1. Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію. *Автоматичне зварювання*, **2**, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>
4. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2021) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: Учебное пособие. Глава 7. Более сложные вопросы теории. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
5. Скальський В.Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техн. діагност. і неразруш. контроль*, **4**, 29–36.
6. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal. ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 4: Cycle Innovations; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine. June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA. 799–805. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2009-59274>
7. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
8. Putti Srinivasa Rao, Ch. Ratnam (2012) Health monitoring of welded structures using statistical process control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **27**, 683–695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.09.023>
9. (2017) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довід. посіб. Т.8 : Методи оцінювання залишкової міцності та довговічності елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю*. (Назарчук З.Т. ред.). Львів, Простір-М.
10. Droubi, Mohamad G., Faisal, Nadimul H., Orr, Fraser, Steel, John A., El-Shaib, Mohamed (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**, 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.012>
11. Aboali, Abdalla, El-Shaib, Mohamed, Sharara, Ashraf, Shehadeh, Mohamed (2014) Screening for welding defects using acoustic emission technique. *Advanced Materials Research*, **1025–1026**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7>
12. Савченко С.В., Тимчик Г.С. (2017) Метод контроля сварных соединений баллистических сталей посредством акустической эмиссии. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Т. 20, 7–10.

References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Tutorial. 5th Ed., Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
2. Shcherbinsky, V.G., Feoktistov, V.A., Polevyk, V.A. et al. (1987) *Methods of flaw detection of welded joints*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A. et al. (2021) Acoustic emission method at evaluation of the state of welds and their service properties. Pt 1. Effect of welded joint type on acoustic emission. *The Paton Welding J.*, **2**, 46–52. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwg2021.02.09>
4. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2021) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*: Tutorial. Chapt. 7. More complex questions of the theory. 5th Ed., Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
5. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based in acoustic emission signals. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29–36 [in Ukrainian].
6. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) *Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal*. ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 4: Cycle Innovations; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine. June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA. 799–805. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2009-59274>
7. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
8. Putti Srinivasa Rao, Ch. Ratnam (2012) Health monitoring of welded structures using statistical process control. *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. **27**, 683–695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.09.023>
9. (2017) *Technical diagnostics of materials and structures: Conclusion. Vol. 8: Methods for assessing the excess value and durability of structural elements based on non-destructive testing data*. (Ed. by Z.T. Nazarchuk). Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
10. Droubi, Mohamad, G., Faisal, Nadimul, H., Orr, Fraser, Steel, John A., El-Shaib, Mohamed (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**, 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.012>
11. Aboali, Abdalla, El-Shaib, Mohamed, Sharara, Ashraf, Shehadeh, Mohamed (2014) Screening for welding defects using acoustic emission technique. *Advanced Materials Research*, Vol. **1025–1026**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7>
12. Savchenko, S.V., Tymchyk, G.S. (2017) Method for inspection of ballistic steel welded joints using acoustic emission. *Bulletin of the NTU KhPI. Series: Mechanical and Technological Systems and Complexes*, Vol. **20**, 7–10 [in Russian]

USE OF WELDED SPECIMENS TESTING FOR ASSESSMENT OF ACOUSTIC EMISSION EQUIPMENT PREDICTIVE PROPERTIES

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, O.I. Boychuk, M.A. Ovsienko, I.G. Voloshkevich

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

E-mail: st_private@hotmail.com, inpat59@ukr.net

The results of specimen tests show a high sensitivity of the acoustic emission method to the quality of the welded joint. This fact can be used for prediction of the destructive loading and strength limit, which is automatically performed by EMA acoustic-emission diagnostic systems. It is shown how testing of the welded specimens with previously unknown strength parameters can be applied to check the prediction of the destructive loading and the strength limit, which is performed using acoustic emission data. The obtained results indicate that such a prediction is successful and does not require additional adjustment of the predefined system settings. 12 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: weld, acoustic emission (AE), destruction of materials, loading, strength limit, prediction

Отримано 04.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 08.05.2024

Прийнято 11.07.2024