

**МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

DOI 10.31891/2307-5732-2020-287-4-94-99

УДК 621.396.6.019.3 : 620.172.21

І.І. КОВТУН, С.А. ПЕТРАЩУК, Ю.М. БОЙКО, Б.О. ПОГОРІЛИЙ

Хмельницький національний університет

**НЕРУЙНІВНА ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ**

Стаття присвячена виявленню інформативних властивостей параметрів сигналів акустичної емісії і їх зв'язку із механічними характеристиками різних матеріалів і деталей під неруйнівним впливом різних навантажень та розробці методик неруйнівного контролю, діагностування та прогнозування їх міцності та місця майбутнього руйнування. Об'єктами досліджень служать зразки різних матеріалів, як однорідних, так і неоднорідних, в тому числі і композитів застосовуваних в електронній техніці для виготовлення несівних елементів конструкцій і електронних компонентів. Це – плоскі зразки сталі Ст3 в стадії промислової поставки та відрізки елементів несучих конструкцій, виготовлені з неметалічного матеріалу – склопластику. В результаті одночасної і синхронної реєстрації та обробки механічних і акустико-емісійних параметрів, отриманих при статичному навантаженні зразків, були отримані наочні графічні залежності – акустограми, які показують зміну параметрів сигналів АЕ від напруження і розподіл джерел сигналів АЕ по довжині зразка. Випробування здійснювались методом статичного навантаження на розтяг і згин.

Ключові слова: акустична емісія, міцність, неруйнівна діагностика, розтяг, згин

I.I. KOVTUN, S.A. PETRASCHUK, J.M. BOIKO, B.O. POGORILYI

Khmelnyskyi National University

**NON-DESTRUCTIVE TECHNICAL DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC MATERIALS  
BY METHOD OF ACOUSTIC EMISSION**

Real materials always have numerous variations from a perfect structure associated with instability of manufacturing technology, which entails strength instability of produced parts what creates a range of problems, especially in manufacturing bearing structural components in electronics and other branches of industry. Standard laboratory tests of material samples or full-scale products conducted by simple types of loading – tension and bending demonstrated possibility to reveal relationships between parameters of acoustic emission, stress in the elastic range of stress and destructive stress and use them for non-destructive diagnostics of strength. The objects of the research are flat samples of steel St3 at original production state and sections of components being load-bearing structures made of non-metallic material – fiberglass. Based on the obtained relationships of acoustic emission parameters, stress in the elastic range of stress and destructive stress, the following methods have been developed for non-destructive testing, diagnostics and strength prediction during non-destructive testing by static load. Loading under proportionality limit produces acoustic emission parameters exceeding the control level, the sample (part) is recognized as defective and its ultimate strength is determined using the prediction coefficient. Linear location of acoustic emission sources according to the maximum total count gives a linear coordinate, along the length of the sample, which locates the future destruction. Method for non-destructive diagnostics and strength prediction of fiberglass samples used in manufacturing structural components in electronic engineering has been designed for non-destructive testing by static bending load. Parameters that estimate the ultimate strength of samples are amplitude and activity of acoustic emission signals. Parameters of acoustic emission signals exceeding the reference level indicate of defective sample, which is then rejected, otherwise its strength complies with standard.

Keywords: acoustic emission, strength, non-destructive diagnostics, tension, bend.

**Вступ**

Реальні матеріали завжди мають численні відхилення від ідеальної структури пов'язані із нестабільністю технології їх виробництва, що спричиняє нестабільність міцності деталей, що випускаються і створює ряд проблем, особливо при виготовленні несівних елементів конструкцій в електроніці та інших галузях техніки. Одним із шляхів виявлення цих відхилень і недосконалостей є дослідження сигналів акустичної емісії (АЕ), які випромінюються дефектами структури матеріалу в процесі їх розвитку під дією навантаження. Виявлення інформативних властивостей параметрів сигналів акустичної емісії, їх зв'язку із механічними характеристиками різних матеріалів і деталей під неруйнівним впливом різних навантажень і розробка методик неруйнівного контролю, діагностування та прогнозування міцності та місця майбутнього руйнування було метою представлених досліджень.

Об'єктами досліджень були зразки різних матеріалів, як однорідних, так і неоднорідних, в тому числі і композитів застосовуваних в електронній техніці для виготовлення несівних елементів конструкцій і електронних компонентів. Це плоскі зразки сталі Ст3 в стадії промислової поставки та відрізки елементів несучих конструкцій, виготовлені з неметалічного матеріалу – склопластику.

**Акустична емісія і міцність металевих зразків**

Дослідження акустико-емісійної поведінки сталі проводилося при випробуванні партії з 80-и плоских зразків сталі Ст3, що мають традиційну форму і виготовлені за стандартом TGL 0-50125 (рис. 1). Випробування всіх зразків проводилося шляхом статичного навантаження розтягуванням на випробувальній машині IP 5057-50 зі швидкістю 5 мм/хв.

Для реєстрації та обробки параметрів сигналів АЕ використовувався програмно-апаратний комплекс АЕ [1]. Реєстрація АЕ велася в діапазоні частот від 20 до 2000 кГц і в діапазоні амплітуд від 60 до 6000 мкВ. Для зняття сигналів АЕ п'єзоелектричні перетворювачі (датчики) кріпилися на зразку, як показано на рис. 1, за допомогою струбцин, через шар акустичної мастила.

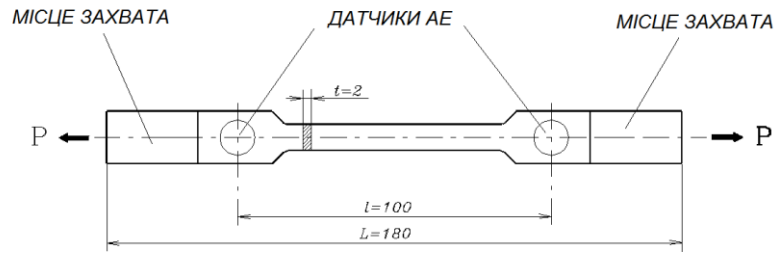


Рис. 1. Випробування зразків сталі механічним навантаженням на розтяг із застосуванням методу акустичної емісії

В результаті одночасного і синхронного зняття і обробки механічних та акустико-емісійних параметрів, отриманих при статичному навантаженні зразків до руйнування, були отримані наочні графічні залежності (акустограми), що показують зміну параметрів сигналів АЕ від напруження і розподіл джерел сигналів АЕ по довжині зразка

На рис. 2, а представлені тривимірні акустограми амплітуди і потужності сигналів АЕ, зразка з границею міцності нижче встановленої за Держстандартом (380–470 МПа), які наочно показують розвиток дефектів структури матеріалу сталевого зразка одночасно по його довжині і в часі навантаження.

Важливим фактом, встановленим при аналізі отриманих акустограм, є наявність сигналів АЕ в зоні пружності, рис. 2, б. Як показують досліді, активність сигналів АЕ на ділянці пружності збільшується пропорційно навантаженню і при досягненні матеріалом границі текучості приймає максимальне значення.

Подібний характер АЕ при збільшенні деформації може бути викликаний переходом основної маси матеріалу з пружного стану в пластичне (лавиноподібний зрив і переміщення дислокацій, утворення систем смуг ковзання і т.д.) [2, 3]. Цей процес є свідченням розвитку і протікання в матеріалі деформацій Чернова-Людерса і виражається в утворенні площадки текучості [4].

На границі текучості активність АЕ досягає свого пікового значення – 40–50 імп/с, або в перерахунку на одиницю об'єму робочої частини зразка  $20\text{--}25 \times 10^{-3}$  імп/с·мм<sup>3</sup>. Дану величину будемо надалі називати питомою активністю і позначати  $\delta_N$ . У роботах [2, 5] показана прямо-пропорційна залежність між активністю АЕ і об'ємом робочої частини матеріалу. Тому на практиці більш зручним є використання питомої активності, так як з'являється можливість характеризувати зразки різного об'єму.

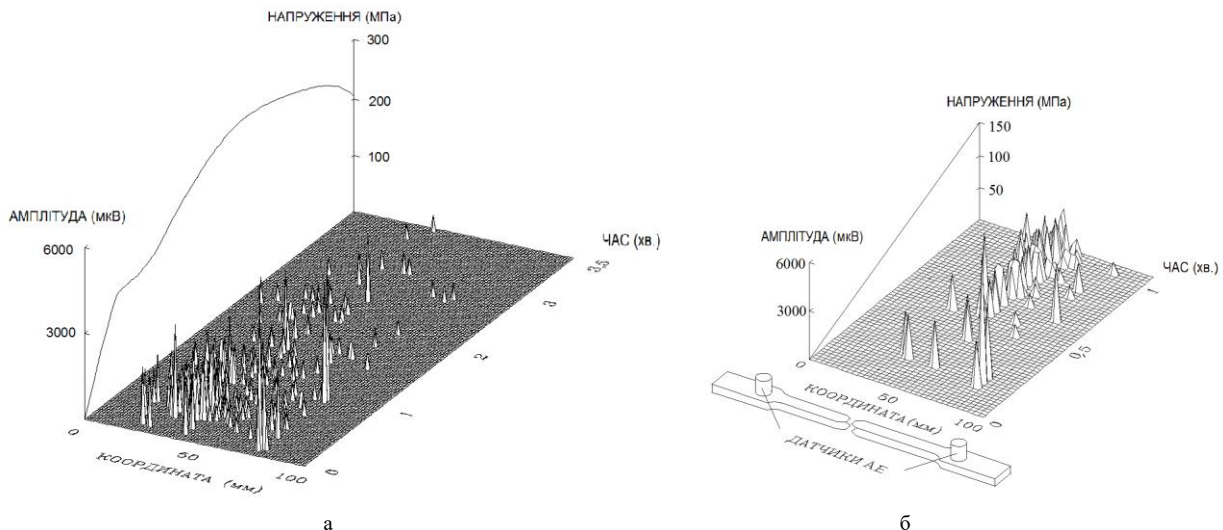


Рис. 2. Акустограми амплітуди сигналів АЕ при руйнівному (а) та неруйнівному (б) навантаженні зразка сталі

Досягнення матеріалом кривої зміцнення характеризується спадом випромінювання сигналів (іноді до нуля) (рис. 2, а), що може бути пояснено тим, що основна частина матеріалу вже пройшла область пластичних деформацій, тим самим створивши бар'єри для руху нових блоків дислокацій, смуг ковзання і т. д.

Після досягнення границі міцності і в момент руйнування знову можуть виникнути сплески сигналів АЕ, вже пов'язані з катастрофічним руйнуванням матеріалу, причиною якого може бути утворення і розвиток магістральної тріщини [5].

Розподіл загального рахунку сигналів, який отримано підсумковим підрахунком сигналів, що виникають в кожному міліметрі зразка, має цілком певний характер, що дозволяє побачити місце майбутнього руйнування ще при безпечних навантаженнях. Місце майбутнього розриву, відповідне лінійній

координаті, в якій загальний рахунок сигналів АЕ має максимум. Це дає підставу стверджувати, що процеси початку руйнування або утворення шийки зразка фіксуються методом АЕ при безпечному навантаженні задовго до того, коли шийку можна виявити традиційними методами, описаними в літературі [4, 6].

Таким чином, застосування інформативного параметра АЕ – загального рахунку сигналів при безпечному для міцності навантаженні відкриває можливість неруйнівної діагностики місця майбутнього руйнування. Крива залежності активності сигналів АЕ від відносної деформації, характерна для тестованих зразків, представлена на рис. 3. Відповідно до [4] криві такого типу властиві також для вуглецевих сталей армко-заліза, металів з ГЦК-решіткою, латуні, алюмінієвих сплавів і сплавів на основі нікелю.

Найбільш інформативною частиною цієї кривої є перший максимум активності АЕ (рис. 3). Як показали матеріали випробувань, цей максимум стабільно відповідає границі текучості металу і може бути використаний для її точного визначення.

Однак, зазначена оцінка міцності параметрами АЕ є руйнівною, бажано ж створити умови для неруйнівного діагностування механічних параметрів, що можливо при випробуванні зразків до безпечного для міцності рівня напружень, наприклад границі пропорційності.

Більший практичний інтерес і кращу кореляцію з параметром АЕ (активністю сигналів АЕ) представляє відносна величина, яка згодом отримала назву коефіцієнта прогнозування міцності:

$$K = \sigma_0 / \sigma_{пр2}, \tag{1}$$

де  $\sigma_0$  – границя міцності зразка,  $\sigma_{пр2}$  – напруження прогнозування, що знаходиться в межах  $0 < \sigma_{пр2} \leq \sigma_{пц}$ , де  $\sigma_{пц}$  – границя пропорційності матеріалу.

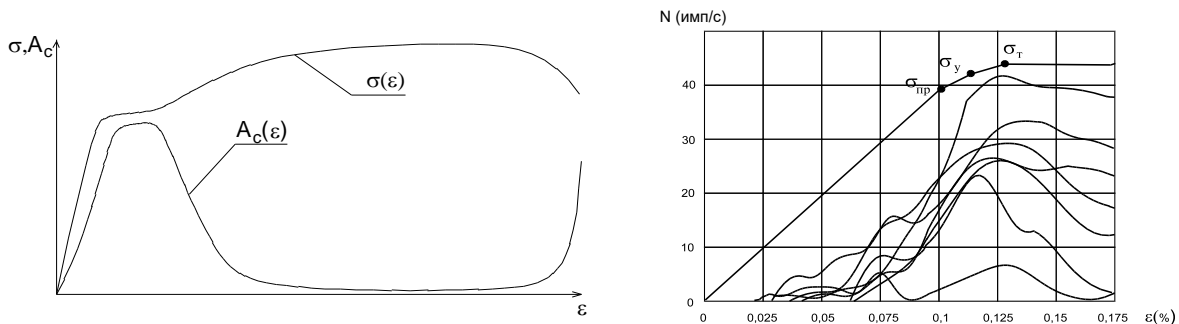


Рис. 3. Залежність активності АЕ (Ac) і напруження (σ) від відносної деформації (ε)

Користуючись цією залежністю при безпечному тестуванні сталевих зразків до напруження, що не перевищує границю пропорційності сталі, за зареєстрованим значенням активності сигналів АЕ  $N$  і відповідному їй напруженню  $\sigma_{пр2}$ , можна визначити  $K$  і розрахувати (спрогнозувати) границю міцності цього зразка. Прогностична границя міцності, відповідно до (1), визначається за формулою:

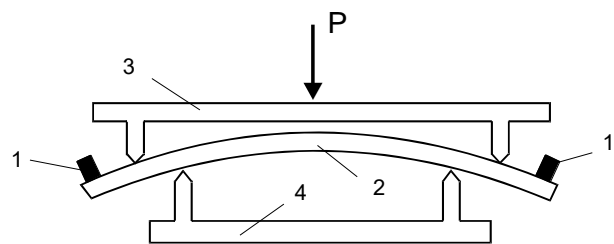
$$\sigma_{пр2}^{пр2} = K \cdot \sigma_{пр2}, \tag{2}$$

Залежність, на якій побудовано неруйнівне діагностування і прогнозування міцності сталевих зразків, була отримана в припущенні наявності лінійної кореляційної залежності між коефіцієнтом прогнозування міцності та активністю сигналів АЕ в зоні навантаження до границі пропорційності сталевих зразків.

У розрахунках за формулою (2) необхідно враховувати цей реально існуючий розкид, тому що  $K$ , яке визначається за (1) приймається меншим на величину  $\Delta$ , тобто  $K_{min} = K - \Delta$ , тоді можлива помилка в прогнозуванні піде в запас міцності. Необхідно відзначити, що подібний вибір  $K$  є одним з можливих; в залежності від того наскільки відповідальним є тестований об'єкт можна приймати і більш низькі значення  $K$  (з отриманої вибірки), збільшуючи тим самим запас міцності, але при цьому, зрозуміло, знижуючи точність прогнозування.

### Акустична емісія і міцність відрізків елементів несучих конструкцій, виготовлених зі склопластику

Акустико-емісійні дослідження склопластикових заготовок (зразків) при статичному навантаженні на згин стало частиною рішення задачі зі створення методик неруйнівного діагностування і прогнозування міцності деталей в електронній промисловості. Випробування проводилися за допомогою випробувальної машини IP5057-50 навантаженням на згин (чотириточковий згин) з постійною швидкістю 5 мм/хв (рис. 4).



1 – п'єзоелектричний датчик; 2 – склопластиковий зразок; 3 – пуансон; 4 – опора

Рис. 4. Схема навантаження зразків склопластику

Проведені випробування дозволили отримати залежності параметрів сигналів АЕ від навантаження і лінійної координати по довжині зразків. На рис. 5 (а) показані типові акустограми амплітуди і на рис. 5 (б) – активності сигналів АЕ, отримані при випробуванні склопластикових зразків.

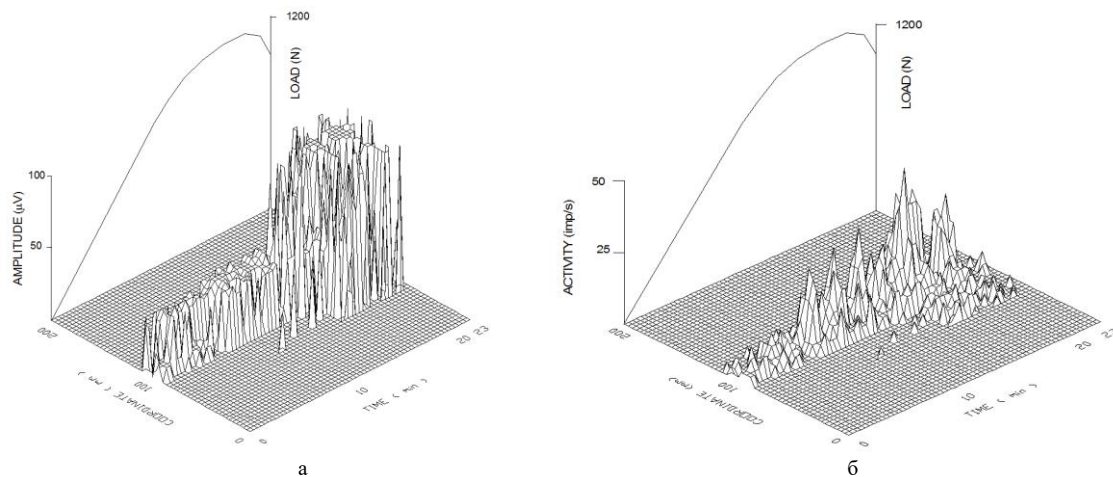


Рис. 5. Залежність амплітуди (а) і активності (б) сигналів АЕ від навантаження по довжині зразка

Подібний тип акустограм був отриманий для всіх випробуваних зразків. Характерним і загальним в поведінці АЕ склопластикових зразків є те, що залежність амплітуди і активності сигналів АЕ від навантаження має завжди один і той же вид, представлений на рис. 6.

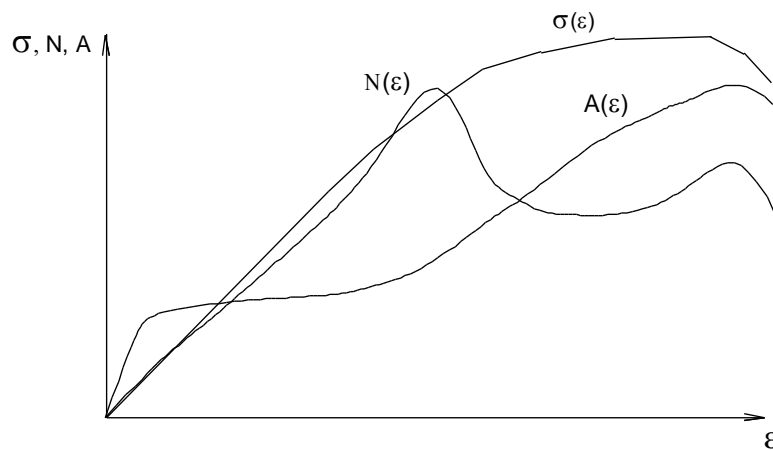


Рис. 6. Криві залежностей амплітуд (А) і активності (N) сигналів АЕ та напружень ( $\sigma$ ) від відносної деформації ( $\epsilon$ ) склопластикових зразків

Як видно із графіків (рис. 5, 6), сигнали АЕ випромінюються одразу ж після початку навантаження, при цьому рівень емісії невисокий – амплітуда сигналів знаходиться на рівні 1200–1800 мкВ (рис. 5, а), а інтенсивність дорівнює приблизно 10 імп/с (рис. 5, б). Цікавим є той факт, що амплітудний рівень залишається постійним від початку навантаження і до досягнення матеріалом зразка деякого критичного навантаження  $P_{кр} = (0,7 \dots 0,8) P_{max}$ . При досягненні цього навантаження має місце різкий сплеск параметрів АЕ. Тут амплітуда сигналів приймає максимальні значення близько 6000 мкВ, активність підвищується до рівня 50–60 імп/с (рис. 5).

Амплітудний розподіл сигналів АЕ на всій ділянці навантаження зразків має свої особливості. Встановлено, що при навантаженні склопластику, в основному проявляються два типи

сигналів АЕ: основний «фон» – низький рівень сигналів близько 1200 мкВ, який присутній від початку навантаження до самого руйнування, і сигнали, які проявляються як амплітудні сплески (понад 3000 мкВ), які з'являються по мірі збільшення навантаження і найбільш явно виявляють себе при перевищенні критичного навантаження  $P_{кр}$ .

Наявність двох різних проявів АЕ може бути пояснено природою їх походження. Структура склопластику являє собою систему волокно-матриця, де волокнами є скловолокно, а матрицею – епоксидна зв'язуюча. Низькорівневе випромінювання сигналів АЕ може бути пов'язано з плінністю і розтріскуванням матриці і руйнуванням границі розділу волокно-матриця [7, 8]. Активність цих сигналів безперервно зростає до рівня навантаження, відповідного  $P_{кр}$ ; даний момент визначається максимумом активності АЕ.

Збільшення навантаження і прогину призводить до того, що вичерпавши запас міцності матриці, руйнування залучає до себе скловолокна. Перші високо-амплітудні сплески свідчать про розрив найбільш слабких волокон, розташованих біля поверхні зразка, де діють максимальні нормальні напруження. Висока амплітуда сигналів АЕ, що виникає при розриві волокон, пояснюється кількістю пружної енергії, яка накопичується і вивільняється при їх розриві [9]. Зростаюча кількість сигналів АЕ відображає кількість зруйнованих волокон, що проявляється підвищенням активності високоамплітудних сигналів [10–13]. Пік

активності цих сигналів відповідає моменту руйнування матеріалу, тут крім розриву окремих волокон можливе включення ще одного виду руйнування – розтріскування матриці і розрив волокон, які об'єднуються в магістральну тріщину, що несе руйнування.

Для перевірки припущення про можливість неруйнівного діагностування міцності, використовуючи підхід, вироблений на сталевих зразках, для 15-ти випробуваних склопластикових зразків були визначені навантаження прогнозування  $P_{npz}$ , які відповідають моменту появи сигналів АЕ, амплітудою 3000 мкВ і активністю 25 імпл/с і обчислені коефіцієнти прогнозування граничного навантаження для кожного зразка:

$$K = P_{\max}/P_{npz}. \quad (3)$$

Виявилось, що коефіцієнти прогнозування для випробуваної партії зразків знаходяться в межах від 2,06 до 3. Як і в випадку із сталевими зразками, така розбіжність пов'язана із нестабільністю технології виробництва склопластику, тому, з огляду на відповідальність тестованих зразків, найбільш раціональним буде, якщо в якості коефіцієнта прогнозування граничного навантаження зразків прийняти мінімальне значення  $K_{\min} = 2$ , тоді можлива помилка піде в запас їх міцності.

Для організації неруйнівного контролю міцності деталей коефіцієнт прогнозування граничного навантаження використовувався для визначення безпечного рівня тестування за формулою:

$$P_{\text{тест}} = P_{\max}^{\text{доп}}/K_{\min}, \quad (4)$$

де  $P_{\max}^{\text{доп}}$  – допустиме значення максимального навантаження склопластикових зразків.

Тепер, навантажуючи зразок до  $P_{\text{тест}}$  і вимірюючи значення амплітуди і активності сигналів АЕ, можна сказати, що тестований зразок є міцним в разі коли амплітуда сигналів не перевищила 3000 мкВ і активність – 25 імпл/с, або в іншому випадку цей зразок визнається дефектним і відбраковується. Крім цього, при необхідності можна спрогнозувати максимальне навантаження зразка, визначивши його за формулою:

$$P_{\max}^{\text{npz}} = P_{npz}/K_{\min}. \quad (5)$$

### Висновки

Показано, що в ході стандартних лабораторних випробувань зразків матеріалів або натурних виробів на прості види навантаження – розтяг та згин, можна отримувати залежності між параметрами сигналів АЕ, напруженням в пружній стадії деформації і руйнівним напруженням і використовувати їх для неруйнівного діагностування міцності.

На підставі отриманих залежностей параметрів сигналів АЕ, напруженням в пружній стадії деформації і руйнівним напруженням розроблено: спосіб неруйнівного контролю, діагностування та прогнозування міцності на прикладі зразків сталі Ст3 при безпечному тестуванні статичним навантаженням, в якому при навантаженні до межі пропорційності у випадку перевищення параметрами АЕ контрольного рівня, зразок (деталь) визнається дефектним і його границя міцності визначається за допомогою коефіцієнта прогнозування, та лінійна локація джерел АЕ по максимуму загального рахунку сигналів АЕ дає лінійну координату місця майбутнього руйнування; методика неруйнівного діагностування і прогнозування міцності склопластикових заготовок при безпечному тестуванні статичним навантаженням на згин, параметрами, які оцінюють границю міцності заготовок є амплітуда і активність сигналів АЕ, при перевищенні параметрами сигналів АЕ контрольного рівня заготовка визнається дефектною і відбраковується, в іншому випадку – придатною до експлуатації.

### References

1. Roizman V.P. Software and hardware complex of acoustic emission / V.P. Roizman, I.I. Kovtun // Measurement and computation technique in technological processes. – Khmelnytsky : KhNU, 1997. – Vol. 1. – P. 25–29.
2. Silin R.I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R.I. Silin, V.P. Roizman, I.I. Kovtun // Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.
3. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // Mechanika. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22. № 6 (2016). – P. 494–489.
4. Pisarenko G.S. Strength of materials / Pisarenko G.S., Kvitka O.L., Umanski E.S. – 2nd edition. – Kiev, 2004. – 655 p.
5. Kovtun I. Development of methods for acoustic emission non-destructive strength diagnostics of components and units / I.I. Kovtun, V.P. Roizman // Scientific collection of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Ser.: Military and technical sciences. – Khmelnytsky : NASBGSU, 2015. – Vol. 3 (65). – P. 311–327.
6. Lall P. Identification of failure modes in portable electronics subjected to mechanical-shock using supervised learning of damage progression / P. Lall, P. Gupta, and K. Goebel // Proc. IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), USA. – 2011. – P. 1944–1957. – DOI: 10.1109/ECTC.2011.5898783.

7. Kahn S., Checkaneck R. Acoustic emission testing of multilayer ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6.4: 517–526.
8. Viswanadham P., and Singh P., “Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages” in Chapman & Hall, MA, Ed. Boston : Springer, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6029-6>.
9. Royzman V. Ways to improve strength reliability of electronics elements and systems, in Proc. IEEE Conf. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE Cat. No.02EX542), Lviv-Slavsko, 2002, pp.187–190. DOI: 10.1109/TCSET.2002.1015917.
10. Kovtun I.I., Boiko J.M., Petrashchuk S.A. (2019), Reliability Improvement of Printed Circuit Boards by Designing Methods for Solder Joint Technical Diagnostics with Application of Acoustic Emission Method, *Visnyk NTUU KPI Seriiia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 79, pp. 60–70.
11. Shannon R., Zucaro G., Tallent J., Collins V., Carswell J. (2019), A system for detecting failed electronics using acoustics, *Instrumentation & Measurement Magazine IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 32–37.
12. Kovtun I. Acoustic emission application for nondestructiv strength diagnostics of printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2018. – Issue 1. – P. 12–17.
13. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Assessing Enclosure Case Design on Excitation and Transmission of Vibration in Electronic Packages // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2019. – P. 265–270.

Рецензія/Peer review : 27.09.2020 р.

Надрукована/Printed :04.11.2020 р.