



Ройзман В. П.

Ковтун І. І.

*Хмельницький
національний
університет*

Royzman V. P.

Kovtun I. I.

*Khmelnyskyi National
University*

УДК 621.01:620.179.1

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ І ПЛАСТИЧНОСТІ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Стаття присвячена дослідженню можливості визначення характеристик міцності матеріалів та деталей, що застосовуються в нафтовій та газовій промисловості, із застосуванням методу акустичної емісії. Для проведення акустико-емісійних експериментів було створено оригінальний програмно-апаратний вимірювальний комплекс. В результаті проведеного аналізу та комп'ютерної обробки акустико-емісійних даних і механічних характеристик було розроблено методику неруйнівного контролю та прогнозування міцності і ресурсу однорідних та композиційних матеріалів і деталей під дією статичних та динамічних навантажень.

Ключові слова: неруйнівний контроль, прогнозування, міцність, пластичність, акустична емісія.

Вступ. Створення сучасних машин і конструкцій високої якості та надійності пов'язано з використанням високоміцних матеріалів з заданими фізико-механічними властивостями. Сьогодні широке застосування знаходять нові, в тому числі композиційні, матеріали та їх з'єднання, з яких виготовляють несучі елементи, відповідальні деталі та конструкції в нафтогазовій та інших галузях промисловості. Однак, нерідко в процесі виробництва в відповідальних деталях з'являються різного роду дефекти (раковини, пори, тріщини, розшарування і т.д.), що призводить до зміни фізико-механічних властивостей, погіршенню надійності та зниженню ресурсу виробів. Тому останнім часом в рішенні задач підвищення надійності виробів отримав розвиток підхід, заснований на вивченні фізичних процесів, які відбуваються в матеріалі (виробі) і є причиною появи поломок.

Більшість відомих методів неруйнівного контролю стану матеріалів, такі як ультразвукова дефектоскопія і рентгенівська радіографія забезпечують лише вибірковий контроль в окремих зонах матеріалу, виявляючи значні дефекти, і не дають інформацію про те, наскільки небезпечним може бути виявлений дефект, хоча той самий дефект може бути небезпечним або безпечним

у залежності від його місця в полі напруг, що виникає при навантаженні матеріалу. На відміну від вищезгаданих методів, метод акустичної емісії (АЕ), заснований на випромінюванні матеріалом при його деформуванні пружних механічних хвиль, джерелом яких є дефекти, що розвиваються, володіє високою чутливістю, можливістю виявити і стежити за поведінкою дефектів, що розвиваються, інтегральністю, що дозволяє контролювати стан матеріалу без сканування, простою використання в процесі випробувань, виробництва й експлуатації, можливістю контролювати різноманітні матеріали, як однорідні, так і неоднорідні, у тому числі і композити. Незважаючи на існування множини робіт із дослідження явища АЕ [1,2,3,4], питання про його практичне застосування для неруйнної діагностики міцності матеріалів все ще є актуальним і потребує подальшого розвитку.

Основна частина. Для проведення досліджень методом акустичної емісії був створений програмно-апаратний комплекс АЕ на базі серійно випущеного акусто-емісійного приладу АФ-15 і персонального комп'ютера [5]. При розробці комплексу було проведено модернізацію трьох субблоків акусто-емісійного приладу, створено модуль комп'ютерного



паралельного інтерфейсу і розроблено пакет прикладних програм, що дозволило комп'ютеризувати процес збору й опрацювання параметрів сигналів АЕ, тим самим підвищивши кількість опрацьовуваних сигналів у 40 разів.

Основною задачею комплексу є документальна реєстрація й опрацювання параметрів сигналів акустичної емісії, що виникають при випробуванні деталей статичними і динамічними навантаженнями. Комплекс застосовується для експериментальної та прикладної діагностики і прогнозування міцності матеріалів, деталей і вузлів машин і апаратів різноманітних галузей народного господарства.

Перші дослідження, метою яких було відпрацювання методики вимірів і апробація апаратури проводилися на зразках сталі Ст3 при статичних випробуваннях стандартним навантаженням на розтяг з одночасною реєстрацією параметрів акустичної емісії. Програмне опрацювання параметрів акустичної емісії і напружень, що виникають у зразках при навантаженні дали ряд практично цінних результатів.

Тривимірні графіки розподілу сигналів АЕ в залежності від напруження і лінійної координати по довжині зразка (рис. 1) показали, що перші сигнали з'являються ще в зоні пружності. Лінійна локація джерел цих сигналів дозволила побачити, що в місці майбутнього руйнування є емісія, тобто йде розвиток дефекту. Більш того, місце майбутнього руйнування чітко позначає себе ще до границі пружності і не віддає своєї першості аж до руйнування, що демонструє графік залежності підсумкового рахунку сигналів АЕ від лінійної координати (рис. 2). Це дало можливість неруйнівної діагностики місця майбутнього руйнування зразків матеріалів, при їх тестуванні.

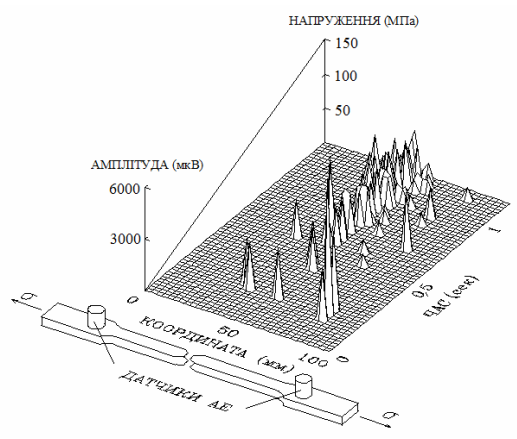


Рис. 1. Акустична емісія в зоні пружності

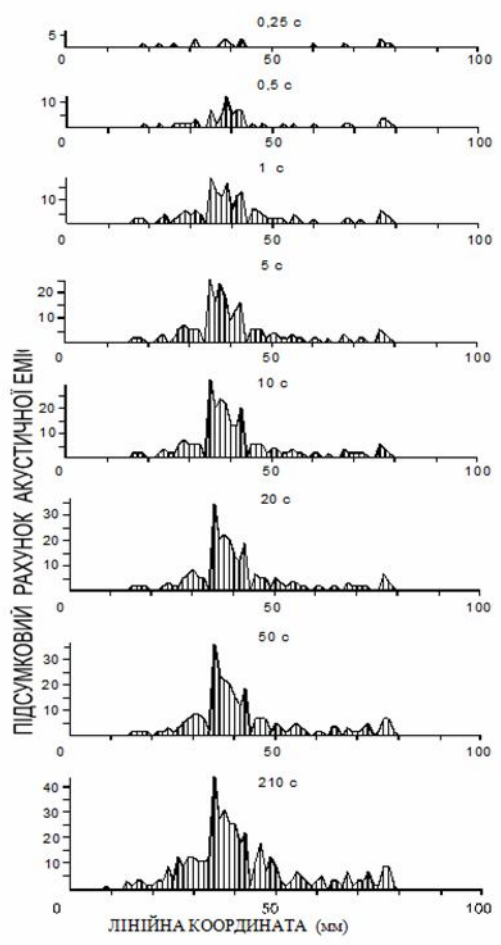


Рис. 2. Лінійна локація дефектів, що розвиваються

Встановлено, що максимум активності АЕ належить площадці текучості. Даний факт був використаний для визначення границі текучості зразків латуні Л68, діаграма розтягу яких не містить явної площадки текучості.

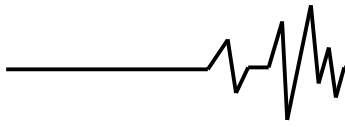
В зоні напружень, які не перевищують границю пропорційності, встановлена лінійна кореляційна залежність між коефіцієнтом прогнозування міцності K , який визначається за формулою

$$K = \frac{\sigma_e}{\sigma_{прз}}, \quad (1)$$

де σ_e – границя міцності зразка, $\sigma_{прз}$ – напруження прогнозування, яке знаходиться в межах $0 < \sigma_{прз} \leq \sigma_{пц}$, де $\sigma_{пц}$ – границя пропорційності матеріалу, та активністю сигналів АЕ N :

$$K = 7,3 - 0,42N. \quad (2)$$

Користуючись залежністю (2) при безпечному тестуванні сталевого зразка до напруження, яке не перевищує границю пропорційності, по зареєстрованому значенню



активності сигналів АЕ N , та відповідного йому напруженню $\sigma'_{пра}$ можна визначити K і розрахувати (спрогнозувати) границю міцності цього зразка. Прогностична границя міцності, у відповідності з (1), знаходиться за формулою

$$\sigma'_{пра} = K \cdot \sigma'_{пра} \quad (3)$$

Отримані за матеріалами випробувань партії зразків сталі Ст3 значення K мають розкид, який є наслідком нестабільності фізико-механічних властивостей випробуваних зразків. Тому для розрахунків по формулі (3) приймається найменше значення K_{min} , яке знаходиться в довірчому інтервалі $\Delta=0,32$, знайденому з ймовірністю $P=0,95$, і тоді можлива помилка в прогнозуванні міцності іде в запас міцності. Подібний вибір K є одним з можливих; в залежності від того, наскільки відповідальним є об'єкт, що тестується, можна приймати і більш низькі значення K (із отриманої вибірки), збільшуючи тим самим запас міцності, але при цьому, звісно, знижуючи точність прогнозування.

Для практичних цілей використання параметру АЕ для неруйнівної діагностики міцності може бути спрощено, при цьому за матеріалами випробувань групи зразків або деталей призначається контрольний, тобто максимальний рівень активності АЕ, який стабільно проявляється в безпечній для міцності зоні напружень і розраховується коефіцієнт прогнозування міцності за формулою (1), де $\sigma_{пра}$ - напруження при якому активність досягла контрольного рівня. При неруйнівній діагностуванні, яке проводиться безпечним тестуванням з одночасною реєстрацією діаграми напружень і активності АЕ, у разі, коли активність АЕ досягла контрольного рівня, прогностична границя міцності визначається за формулою (3); у протилежному випадку вона визнається не меншою допустимої.

Розроблений на прикладі зразків сталі Ст3 засіб неруйнівного діагностування і прогнозування міцності знайшов застосування при дослідженні натурних виробів.

Дослідження склопластикових заготовок, які використовуються для виготовлення насосних штанг, виконувались по замовленню Нафтогазової промисловості. Випробування проводились при статичному навантаженні заготовок на чотирьох-точковий згин, при якому в заготовці, по всій її довжині, виникають однакові напруження. Одночасно з реєстрацією механічних параметрів проводилась комп'ютерна реєстрація і обробка параметрів сигналів АЕ. Типова акустограма, отримана при тестуванні зразка, показана на рис. 3.

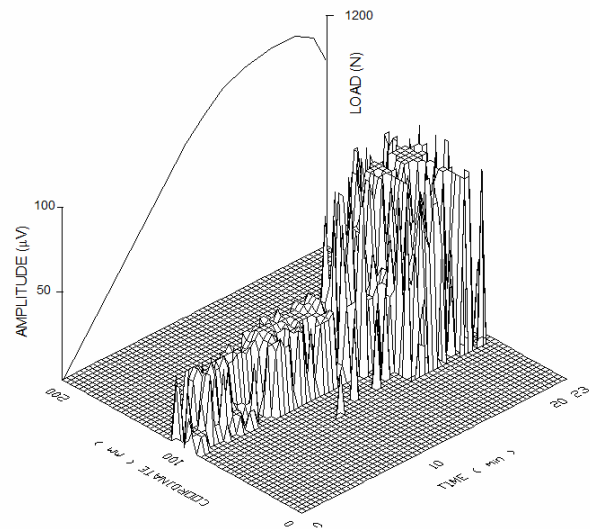


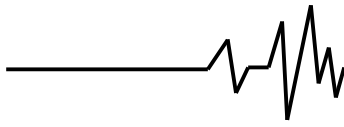
Рис. 3. Залежність амплітуди сигналів АЕ від навантаження і лінійної координати по довжині зразка

По матеріалам експериментів, отриманих за допомогою методу АЕ, була проведена ампліудна селекція сигналів АЕ. Було встановлено, що при навантаженні склопластику, в основному простежуються два типи сигналів АЕ: основний "фон" – низький рівень сигналів біля 1200мкВ, що є присутнім від початку навантаження до самого руйнування, і сигнали, що проявляються як амплітудні сплески (понад 3000мкВ), з'являються по мірі збільшення навантаження і найбільше явно виявляють себе перед руйнуванням. Було встановлено, що максимум активності сигналів низького рівня і наявність високо-амплітудних сигналів показують (передвіщають) момент початку катастрофічних змін в структурі матеріалу.

На основі отриманих результатів розроблена методика неруйнівного діагностування і прогнозування міцності заготовок, у якій параметрами, які характеризують міцність, є амплітуда і активність сигналів АЕ; у випадку перевищення параметрами сигналів АЕ контрольного (максимально-допустимого) рівня при тестуванні до безпечного навантаження $P_{мест}$ (4) заготовка признається дефектною й відбраковується, у протилежному випадку її міцність вважається не нижче допустимої.

$$P_{мест} = P_{max} / K \quad (4)$$

де P_{max} – допустиме значення максимального навантаження заготовок, K – коефіцієнт прогнозування максимального навантаження, розрахований по матеріалам випробувань заготовок аналогічно формулі (1); враховуючи відповідальність насосних штанг (експлуатація



в добувній шахті), які виготовляються з заготовок, з отриманого інтервалу значень $K=(2,06-3)$ було прийнято найменше значення $K=K_{min}=2$.

Крім статичних випробувань були проведені динамічні (втомні) випробування, але вже не зразків матеріалу (заготовок), а натурних виробів - насосних штанг.

Тестування насосних штанг проводилось на вібростенді ВЗДС-200 з одночасним записом напружень від тензодатчиків і параметрів АЕ від датчиків АЕ. Насосні штанги закріплювалися на робочому столі вібростенда за допомогою спеціально створеного пристосування. Одним кінцем – металевим перехідником – штанга кріпилася у пристосуванні, а на її інший кінець для збільшення напружень у матеріалі штанги встановлювався вантаж вагою 50г.

Випробування проводились на резонансній частоті, яка відповідає першій формі коливань. Тензодатчики наклеювалися на певній відстані від місця закріплення деталі, щоб запобігти виходу їх із ладу від діючих надмірних напружень. Датчики АЕ встановлювалися на кріпильному пристосуванні, безпосередньо над місцем защемлення, так як встановлення датчиків на самій деталі приводило до появи тертя між ними і випромінювання акусто-емісійних сигналів-перешкод.

Реєстрація і обробка параметрів АЕ і напружень, показала що на деякому циклі випробування після появи сигналів АЕ напруга дещо падає, (приблизно на 10-15%) після чого сигнали АЕ припиняються. Це може бути пояснено появою мікротріщин, їхнім розвитком, при якому жорсткість деталі знижується і задана вібростендом частота коливань уже не є резонансною, через що і знижується напруга та припиняється емісія. Далі режим резонансних випробувань відновлявся шляхом коригування частоти і посилення амплітуди коливань; напруження відновлялися і далі якийсь час випробувань утримувався заданий рівень напружень і емісія, потім усе повторювалося і так до поломки деталі.

Висновки

Характерним для досліджених деталей є те, що за декілька тисяч циклів навантажень до руйнування акустична емісія різко зростала і вже не знижувалась, а зростала до самого руйнування. Таким чином встановлено, що задовго до катастрофічної руйнації з'являються сигнали АЕ, як попередження про початок процесу втомного руйнування.

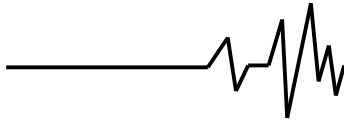
Слід зазначити, що зразки натурних насосних штанг не руйнувалися протягом 150 часів іспитів, тобто 14690000 циклів після появи перших сигналів АЕ при контрольному напруженні зафіксованому тензорезистором рівному 50 МПа. Це свідчить про високу спроможність композиційного матеріалу нафтогазових штанг і труб опиратися перемінним напруженням, а також про можливість використання методу АЕ для неруйнівного контролю і прогнозування міцності натурних деталей, тобто для своєчасного попередження про наближення небезпечних станів досліджуваних або працюючих деталей.

Список використаних джерел

1. Грешников В. А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В. А. Грешников, Ю. В. Дробот. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
2. Бунина Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии / Н. А. Бунина – Л. : ЛГУ, 1990. – 156 с.
3. Ермолов И. Н. Неразрушающий контроль. Кн.2. Акустические методы контроля.: Практическое пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов / Под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.
4. Баранов В. М. Установка для исследования акустической эмиссии в широком интервале температур / В. М. Баранов, Ю. В. Милосердин, С. А. Рыжков // Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений: Тезисы докл. Всес. науч.-техн. семинара. – Хабаровск (Хабаровск, дом. техники. Хабаровск. краев. упр. НТО Машпром.), 1972. – с. 10.
5. Ковтун И. И. Диагностика прочности неразъемных элементов конструкций методом акустической эмиссии: Канд. Дис. ТУП / Игорь Иванович Ковтун, Технологический университет Подолья. – Хмельницкий, 1998.

Список джерел в транслітерації

1. Greshnikov V. A. Akusticheskaya emissiya. Primeneniye dlya ispytaniy materialov i izdeliy / V. A. greshnikov, Yu. V. Drobot. – M.: Izd-vo standartov, 1976 – 272 s.
2. Bunina N. A. Issledovaniye plasticheskoy deformatsii metallov metodom akusticheskoy emissii / N. A. Bunina – L.: LGU, 1990. – 156 s.
3. Yermolov I. N. Nerazrushayushchiy



kontrol. Kn.2. Akusticheskiye metody kontrolya.: Prakticheskoye posobiye / I.N. Yermolov, N.P. Aleshin, A.I. Potapov / Pod red. V. V. Sukhorukova. – M.: Vyssh. shk., 1991. – 283 s.

4. Baranov V. M. Ustanovka dlya issledovaniya akusticheskoy emissii v shirokom intervale temperatur / V. Baranov, Yu. V. Miloserdin, S. A. Ryzhkov // Nerazrushayushchiy kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsionnykh materialov i izdeliy s vnedreniyem emissii voln napryazheniy: Tezisy dokl. Vses. nauch.-tekh. seminara. – Khabarovsk (Khabarovsk, dom. Tekhniki. Khabarovsk. Krayev. Upr. NTO Mashprom.), 1972. – s. 10.

5. Kovtun I. I. Diagnostika prochnosti neraz"yemnykh elementov konstruktsiy metodom akusticheskoy emissii: Kand. Dis. OUP / Igor' Ivanovich Kovtun, Tekhnologicheskiy universitet Podolya. – Khmel'nitskiy, 1998.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможности определения характеристик прочности материалов и деталей, которые применяются в нефтегазовой промышленности, с использованием метода акустической эмиссии. Для проведения акустико-эмиссионных экспериментов был создан

оригинальный программно-аппаратный измерительный комплекс. В результате проведенного анализа и компьютерной обработки акустико-эмиссионных данных и механических характеристик была разработана методика неразрушающего контроля и прогнозирования прочности и ресурса однородных и композиционных материалов и деталей под действием статических и динамических нагрузок.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, прогнозирование, прочность, пластичность, акустическая эмиссия.

NONDESTRUCTIVE CONTROLLING AND PREDICTING STRENGTH AND PLASTICITY CHARACTERISTICS OF MATERIALS BY USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

Annotation. The paper is devoted to the research of possibility to define strength characteristics of materials and details, applied in oil and gas industry by means of acoustic emission method. For carrying out acoustic emission experiments there was the original computer measuring complex created. Analyzing and computer processing of acoustic emission and mechanical characteristics resulted in developing of non-destructive methods for controlling and prediction of strength and resources of homogeneous and composite materials and details under static and dynamic loading.

Key words: non-destructive control, predicting, strength, plasticity, acoustic emission.