

УДК 539.37

Глива Валентин АнатолійовичДоктор технічних наук, професор, професор кафедри безпеки життєдіяльності,
orcid.org/0000-0003-1257-3351

Національний авіаційний університет, Київ

СИСТЕМА ВІБРОАКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ТА МЕХАНІЗМ ЗАРОДЖЕННЯ МІКРОТРИЩИН У МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

***Анотація.** Дослідження виконувалося на зразках нержавіючої сталі, у якій дефекти важко виявляються методами неруйнівного контролю, зокрема акустичної емісії, через велику в'язкість цієї сталі. Досліджувалася зміна дислокаційної структури у матеріалі за різних кількостей знакозмінних навантажень. Спостереження здійснювалися методом електронної мікроскопії «на просвічування». Було отримано типові дислокаційні структури як у вихідному стані, так і за різних кількостей циклів навантажень. Зокрема спостерігалися упорядкований перерозподіл дислокацій у середині зерен, формування смуг ковзання. Було зафіксовано зміну структури внаслідок появи і розвитку процесів двійникування. За великих кількостей циклів навантажень (кілька сотень тисяч) спостерігалося накопичення дислокацій на границях зерен, а на останній стадії – формування смуг надзвичайно великих їх щільностей. Це призводить до проривання границь зерна та появи мікротріщин. Отримання цих даних методом прямих спостережень дало змогу встановити відповідність зміни макрохарактеристик (наприклад, віброакустичних) з фактичним станом мікроструктури. Таким чином, можливе визначення початкових стадій несприятливих змін у конструкційних матеріалах за механічних навантажень, далеких від границь плинності та міцності.*

***Ключові слова:** тріщиноутворення; діагностування; дислокаційна структура; конструкційні матеріали; віброакустичні характеристики*

Вступ

Дослідження процесів тріщиноутворення у конструкційних матеріалах різного призначення та їх діагностування є однією з актуальних задач матеріалознавства. Це пов'язано зі зростанням ймовірності руйнування елементів конструкцій внаслідок втомних процесів. Значною мірою це стосується знакозмінних навантажень несучих конструкцій транспортних засобів, зокрема літальних апаратів. Більшість досліджень у цій галузі стосуються зародження та розвитку магістральних тріщин, в той час як механізм зародження мікротріщин, з яких формуються макротріщини, багато в чому є дискусійним, що потребує з'ясування динаміки цього процесу методами прямого спостереження.

Стан питання

Переважає більшість досліджень – як теоретичних, так і експериментальних, розглядає розвиток тріщин поблизу ініціатора (штучної тріщини) [1; 2]. Ці роботи є теоретичними і фактично стосуються передруйнівних стадій. Перевірка цих напрацювань здійснювалася

металографічними методами, що не завжди відповідає процесам, які відбуваються у внутрішніх шарах матеріалів на попередніх стадіях навантажень. До того ж процеси у модельних (полімерних) матеріалах суттєво відрізняються від процесів у металевих матеріалах з різним фазовим складом. Це ж стосується даних, отриманих для монокристалічних матеріалів [3].

Дослідження тріщиноутворення у реальних конструкційних матеріалах складніші, а їх результати дещо неоднозначні. Втім розуміння механізмів зародження мікротріщин, формування та розвитку втомних тріщин вкрай важливе для обирання металів для виготовлення деталей машин і механізмів, які працюють за різних механічних навантажень: статичних, знакозмінних тощо.

У роботі [4] розглянуто утворення та розповсюдження втомних тріщин внаслідок дислокаційних механізмів. Зокрема, проаналізовано механізми утворення виступів і западин на поверхні зразків за Моттом та Котреллом-Халлом. Зроблено висновок, що деякі положення обох механізмів не підтверджуються експериментально, і до питання розповсюдження тріщин доцільно застосовувати енергетичний підхід Гріффітса. Втім за циклічних навантажень отримання кількісних даних досить

проблематичне. Тому становить значний інтерес пряме спостереження структурних змін конструкційних матеріалів за різних кількостей знакозмінних деформацій та навантажень, далеких від межі плинності.

На сьогодні більшість методів діагностування стосуються виявлення дефектів, які з'являються після тривалої експлуатації конструкцій, або після закритичних навантажень [5]. При цьому акустичні методи у переважній більшості оперують виявленням ультразвукових сигналів, які генеруються під час розвитку дефектів [6 – 9]. Попередні дослідження довели безпосередній зв'язок зародження та розвитку мікротріщин за зміною віброакустичних характеристик елементів конструкцій [10]. Тому важливим уявляється дослідження механізму структурних змін до стадії зародження мікротріщин за навантажень, далеких від межі плинності, в умовах вібраційних навантажень та виявлення їх зв'язків зі змінами акустичних характеристик конструкцій.

Мета статті

Метою статті є дослідження структурних змін у конструкційному сплаві на різних стадіях докритичних навантажень та встановлення їх впливу на віброакустичні характеристики конструкцій.

Виклад основного матеріалу

Для проведення попередніх досліджень було використано бездефектні металеві балки і балки з дефектами (тріщинами). Зроблено припущення, що поява дефекту супроводжується зміною амплітуд віброприскорення та власних частот механічної конструкції. Зміна власних частот призводить до зміни піків на спектрі віброприскорення. Провівши порівняння спектрів з дефектом та без нього, можливо встановити наявність дефекту в механічній конструкції. На рис. 1 показано спектри віброприскорення затиснутої балки з дефектом та без нього при збудженні балки, що має довжину a , силою в $0,1 \text{ Н}$ в позиції $0,315a$.

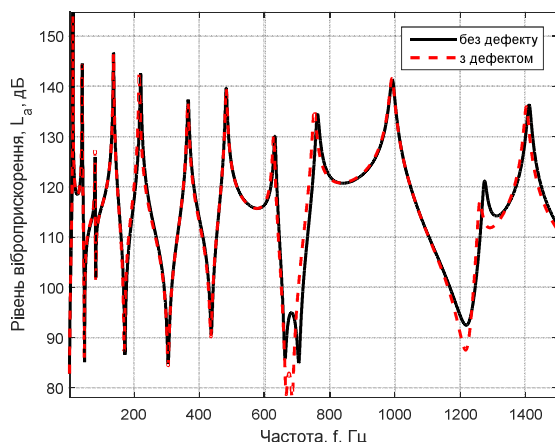


Рисунок 1 – Спектр віброприскорення затиснутої балки

У використаній моделі дефект представлений у вигляді безмасової обертальної пружини, пружність якої залежить від глибини дефекту. Основні параметри досліджуваної балки з дефектом наведені у таблиці.

Таблиця – Основні параметри дослідженої балки з дефектом

Параметр	Значення	Розмірність
Довжина, a	600	мм
Ширина, b	25	мм
Товщина, h	1,5	мм
Густина, ρ	7876,6	кг/м ³
Коефіцієнт Пуассона	0,3	
Коефіцієнт затухання	0,01	
Глибина прорізу, h_d	0,75	мм
Ширина прорізу, l_d	1,2	мм
Координати прорізу x_d	189	мм
Координата прикладення сили	285	мм
Маса з'єднання	29,35	г

Як видно з отриманих результатів, віброакустичні характеристики балок відрізняються на деяких частотах, що дає змогу діагностувати появу тріщин.

Для проведення мікроструктурних досліджень обрано нержавіючу сталь 12Х18Н10Т аустенітного класу, яка широко використовується у хімічній і нафтопереробній промисловостях та для виробництва обладнання, яке працює за криогенних температур і піддається значним пульсуючим низькочастотним впливам [11]. З неї виготовлялися зразки з розмірами робочої частини $30 \times 3 \times 2$ мм, які піддавалися знакозмінним навантажнням. Ці навантаження не перевищували значень 50-60 МПа (межа міцності цієї сталі становить 520 МПа, межа плинності – 200 МПа).

Металографічні дослідження виконувалися за допомогою металографічного мікроскопа МИМ-8. Структурні дослідження виконувалися методом тонких фольг «на просвічування» на електронному мікроскопі TESLA BS540.

Структурні зміни у випробуваних зразках досліджувалися на стадіях від кількох десятків тисяч до кількох сотень тисяч знакозмінних навантажень.

Структурні зміни поверхні зразків наведено на рис. 2.

Отримані дані не дають уяви про структурні зміни у внутрішніх шарах матеріалів (зміни дислокаційної структури). Це можливе лише методом електронної мікроскопії. Слід зауважити, що через великі збільшення огляд великої ділянки зразка неможливий, тому не можна казати про чіткий зв'язок кількості циклів навантажень зі структурними змінами. Втім, загальні закономірності можна простежити.



а



б

Рисунок 2 – Структури поверхонь зразків:
а – після 30 тис. циклів навантажень (x230);
б – вихідний стан

На рис. 3 порівняно вихідний стан дислокаційної структури зі структурою на ранніх стадіях навантаження.



а



б

Рисунок 3 – Зміна дислокаційної структури зразків:
а – вихідний стан; б – після 30 тис. циклів (x10000)

З рис. 3 видно, що на початкових стадіях навантажень починають формуватися смуги ковзання, наявність яких свідчать про початок процесу незворотної деформації. За подальших навантажень процес деформації відбувається за рахунок двійникування (рис. 4)



а



б

Рисунок 4 – Поява (а) і розвиток (б) деформації за рахунок процесу двійникування (x10000)

На наступних стадіях навантажень (кілька сот тисяч циклів) спостерігається значний перерозподіл щільності дислокацій та їх критичне накопичення на границях зерен (рис. 5).

Смуга надмірної щільності дислокацій на рис. 3, б свідчить про зародження мікротріщини. Слід зауважити, що таке поодиноке явище не обов'язково спричиняє розвиток макротріщини. Вона може зникнути зі зміною напрямку деформації, але за наявності кількох таких структур їх поєднання веде до появи і росту мікротріщини, що закінчується появою макродефекта.



а



б

Рисунок 5 – Дислокаційна структура зразків на границях зерен: а – накопичення дислокацій та границях; б – насичення, яке веде до прориву стінки зерна (x10000)

Прямі спостереження динаміки розвитку пластичної деформації до появи мікротріщин дає змогу порівняти фактичний стан металевої конструкції з її віброакустичними характеристиками. Це відкриває можливості здійснювати повний контроль стану виробів важливого призначення за навантажень, далеких від критичних значень та контролювати процес втомних явищ.

Висновки

1. Віброакустичний контроль стану металевих конструкцій різного призначення дозволяє надійно діагностувати появу тріщин у них.

2. Прямі спостереження процесу структурних змін (динаміка дислокаційної структури) відкриває можливість порівняння віброакустичних характеристик конструкцій з їх фактичним станом на різних стадіях пластичної деформації та за різних кількостей знакозмінних навантажень.

3. Отримані результати дозволяють розробити цілісну систему віброакустичного діагностування (у тому числі і неперервного) стану металевих конструкцій за навантажень, далеких від критичних значень.

4. Важливим є створення бази даних щодо відповідності змін віброакустичних характеристик структурним змінам у металевих матеріалах різних класів та різного фазового складу. Це є предметом подальших досліджень.

Список літератури

1. Шабанов А.П. О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений / А.П. Шабанов // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т.46. – №6. – С. 108-115.
2. Лесковский А.М. Некоторые аспекты зарождения и развития трещин микро- мезомасштаба и квазихрупкое разрушение однородных материалов / А.М. Лесковский, Б.А. Баскин // Физика твёрдого тела. – 2011. – т. 53. – Вып. 6. – С. 1157-1169.
3. Майер А.Е. Модель разрушения металлов при высокоскоростной деформации / А.Е. Майер // Вестник Челябинского государственного университета. – 2011. – № 12. – С. 12-20.
4. Кравцов М.К. Оборудование и распространение усталостных трещин / М.К. Кравцов, Т.А. Оболенская, С.Г. Безуглый // Машинобудування. – 2010. – № 5. – С. 151-159.
5. Єременко Ю.М. Огляд та аналіз методів і моделей діагностування об'єктів будівництва / Б.М. Єременко // Теорія і практика будівництва. – 2012. – Вип.9. – С. 43-46.
6. ДСТУ 4221-2003. Настанови щодо проведення акустично-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки. – Чинний від 01.10.2004. – К.: Держстандарт України, 2003.
7. РД ЭО 0624-2005. Моніторинг будівельних конструкцій АЕС. Загальні положення. – Чинний від 27.03.2007 розпор. ДП НАЕК „Енергоатом” № 257).
8. Ультразвуковой метод неруйнівного контролю температурных полей и термических напряг в корпусах ядерных реакторов типа ВВЕР440 та ВВЕР 1000 при імпульсному тепловому навантаженні / О.І. Запорожець, М.О. Дордієнко, В.А. Михайловський та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наук.пр. – К.: ІЕЗ НАН України. – 2006. – С.212-221.
9. Глива В.А. Неперервний акустичний контроль та ідентифікація тріциноутворення в металевих конструкціях / В.А. Глива, М.І. Делас, Б.М. Єременко // Управління розвитком складних систем. – 2013. – Вип. 15. – С.115-118.

10. Глива В.А. Статична модель діагностування тріциноутворення у металевих конструкціях / В.А. Глива, М.І.Делас, В.І. Токарев, В.І.Клапченко// Управління розвитком складних систем . – 2013. – Вип.15. – С.119-125.

11. Розробка методу оцінки ступеня пошкодження обладнання нафтопереробної промисловості / М.С. Хома, В.І. Похмуровський, О.Г. Архипова та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин.: Зб.наук.праць – К.: ІВЗ НАН України. – 2009. –С. 149-154.

Стаття надійшла до редколегії 05.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Воробйов, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

Глива Валентин Анатольевич

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, orcid.org/0000-0003-1257-3351

Национальный авиационный университет, Киев

СИСТЕМА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И МЕХАНИЗМ ЗАРОЖДЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация. Исследование выполнялось на образцах нержавеющей стали, дефекты в которой трудно выявляются методами неразрушающего контроля, в частности акустической эмиссии, через большую вязкость этой стали. Исследовалось изменение дислокационной структуры в материале при различных количествах знакопеременных нагрузок. Наблюдение осуществлялось методом электронной микроскопии «на просвет». Были получены типичные дислокационные структуры как в исходном состоянии, так и на разных количествах циклов нагрузок. В частности наблюдалось упорядоченное перераспределение дислокаций в середине зерен, формирование полос скольжения. Было зафиксировано изменение структуры за счет появления и развития процессов двойникования. При больших количествах циклов нагрузок (несколько сотен тысяч) наблюдалось накопление дислокаций на границах зерен, а на последней стадии – формирование полос чрезвычайно больших их плотностей. Это приводит к прорыву границ зерна и появлению микротрещин. Получение этих данных методом прямых наблюдений дало возможность установить соответствие изменения макрохарактеристик (например, виброакустических) с фактическим состоянием микроструктуры. Таким образом, возможно определение начальных стадий неблагоприятных изменений в конструкционных материалах по механическим нагрузкам, далеким от границ текучести и прочности.

Ключевые слова: трещинообразование; диагностирование; дислокационная структура; конструкционные материалы; виброакустические характеристики

Gluva Valentyн

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Life Safety, orcid.org/0000-0003-1257-3351
National Aviation University, Kiev

SYSTEM OF VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS AND CRACK FORMATION, MECHANISM OF NUCLEATION OF MICROCRACKS IN THE METAL STRUCTURES

Abstract. Investigation of the processes of crack formation is actual direction of materials science due to not fully clarified aspects of this issue. Particularly important is the link between structural changes in metal alloys and mechanical characteristics of these products. It is one of the promising directions of nondestructive testing of the physical state of the metal structures. It has been suggested that the presence of cracks change the vibration characteristics of structural materials. This was confirmed by tests on a model material. But the important is to determine the changes in the microstructure of materials at the stages of stress, far from the nucleation of macroscopic defects, which will establish a clear link with the deformation process of subcritical changes vibroacoustic characteristics of structures. Research was carried on samples of stainless steel, in which defects come to light by non-destructive difficult to control, especially acoustic emission, through most of the steel viscosity. We investigated the change of the dislocation structure of the material at different amounts of alternating loads. The observation carried by electron microscopy in the "transmission". We were obtained typical dislocation structure in the initial state, and the different amounts of loading cycles. In particular orderly redistribution of dislocations was observed in the middle of the grain, the formation of slip bands. It was fixed changes in the structure due to the emergence and development of the twinning process. When large quantities load cycles (several hundreds of thousands) observed accumulation of dislocations at the grain boundaries and in the last stage – the formation of extremely large strips of their densities. It leads to a breakthrough of grain boundaries and appearance of microcracks. Getting those data by direct observation made it possible to establish accordance the microscopic changes (such as vibro-acoustic) with the actual state of the microstructure. Thus, it can determine the initial stages of adverse changes in structural materials by mechanical stress, far from the boundary fluidity and solidity.

Keywords: a crack formation; diagnostics; dislocation structure; structural materials; vibroacoustic characteristics.

References

1. Shchabanov, A.P. (2005). *On the mechanism of fatigue crack growth in the field of external compressive stress // Applied Mechanics and Technical Physics. Moscow. Russia: 46, 6, 108-115.*
2. Leskovskiy, A.M. (2011). *Some aspects of the birth and development of micro-cracks mesoscale and quasi-brittle destruction of homogeneous materials / A.M. Leskovskiy, B.A. Baskin // Solid State Physics. Moscow. Russia: 53, 6, 1157-1169.*
3. Maer, A.E. (2011). *Model of destruction of metals at high deformation. Bulletin of the Chelyabinsk State University. Chelyabinsk. Russia: 12, 12-20.*
4. Kravtsov, M.K. (2010). *Equipment and of fatigue crack propagation / M.K. Kravtsov, T.A. Obolenskaya, S.G. Bezugly // Machine building. Kyiv, Ukraine: 5, 151-159.*
5. Eremenko, Yu.M. (2012). *Review and analysis of methods and models diagnosing objects of building. Kyiv, Ukraine: 9, 43.-46.*
6. *Guidelines for conducting acoustic emission monitoring hazard installations. (2003). DSTU 4221 from 01st October 2004. Kyiv: DerzhspozhyvstandartUkrayiny[in Ukrainian].*
7. *Monitoring building structures NPP. General provisions. (2005). RDEO 0624 from 27st March 2007. DP NAEK "Energoatom", Order257. Kyiv.: [in Ukrainian].*
8. Zaporozhets, O.I. & Dordienko, M.O. & Mykhaylovsky V.A. (2006). *Ultrasonic method of nondestructive testing temperature fields and of thermal stresses in buildings VVER440 type nuclear reactors and VVER 1000 under pulsed heat load // Problems of resource and safety of structures, buildings and machines. . Kyiv, IEZ National Academy of Sciences, Ukraine: 212-221.*
9. Glyva, V.A. (2013). *Continuous acoustic control and identification crack formation in metal structures / V.A. Glyva, M.I. Delas, B.M. Eremenko // Management of Development of Complex Systems. Kyiv, Ukraine: 15, 115-118.*
10. Glyva, V.A. (2013). *Static model of diagnosing crack formation in metal structures / V.A. Glyva, M.I. Delas, V.I. Tokarev, V.I. Klapchenko // Management of Development of Complex Systems. Kyiv, Ukraine: 15, 119-125.*
11. Khoma, M.S. (2009). *Development of the method for assessing the degree of damage to the equipment oil refining industry / M.S. Khoma, V.I. Pokhmurovsky, O.G. Arkhipova // Problems of resource and safety of structures, buildings and machines. Kyiv, IEZ National Academy of Sciences, Ukraine: 149-154.*

Посилання на публікацію

- APA Glyva, V.A. (2015). *System of vibroacoustic diagnostics and crack formation, mechanism of nucleation of microcracks in the metal structures. Management of Development of Complex Systems, 24, 164 – 169.*
- ГОСТ Глива, В.А. Система віброакустичного діагностування тріщиноутворення та механізм зародження мікротріщин у металевих конструкціях [Текст] / В.А. Глива // Управління розвитком складних систем. – 2015. – № 24. – С. 164 – 169.