

УДК 539.37

Б.Д. Халмурадов, В.А. Глива, В.М. Макаренко

Національний авіаційний університет, Київ

МОНІТОРИНГ ФІЗИЧНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Дослідження виконувалося на зразках нержавіючої сталі, дефекти у якій 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 за рахунок 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 прориву границь зерна та появи мікротріщин. Отримання цих даних методом прямих спостережень надало 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; моніторинг; 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. Переважна 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 процесу модельних (полімерних) матеріалів 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 більш складні, а їх результати дещо неоднозначні. Втім розуміння механізмів зародження мікротріщин, формування та

розвитку втомних тріщин вкрай важливе для обрання 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 за рахунок 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 сьогоднішній день 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.

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

Дослідження акустичних сигналів, що надходять з конструкційних матеріалів, як в ультразвуковій області (акустична емісія), так у звуковій частині

акустичного спектра показали наявність певних закономірностей. Так, огинаючи амплітуд звукових сигналів, що надходять зі зразків конструкційних матеріалів, в залежності від стану матеріалів з точки зору наявності або відсутності дефектів відрізняються.

На рис. 1 наведені такі криві, у яких як відсутні так і присутні механічні дефекти, що було заздалегідь відомо.

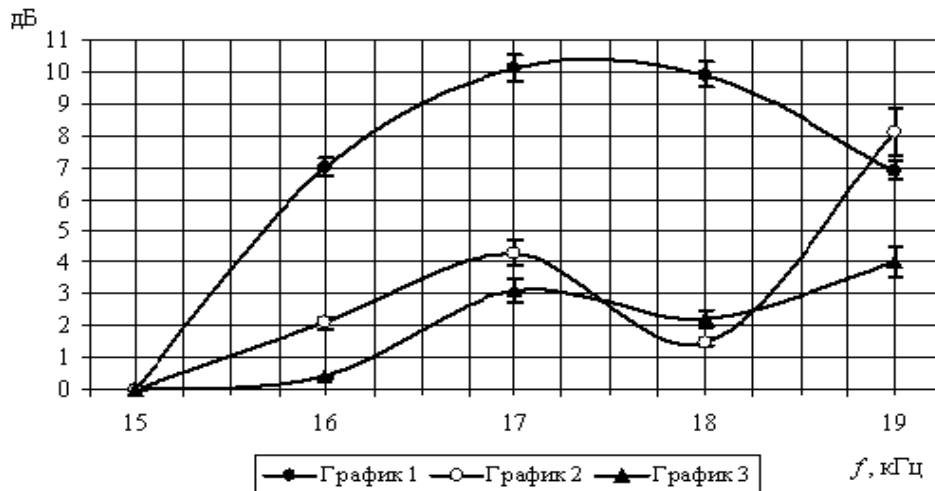


Рис. 1. Залежність амплітуд звукових сигналів з конструкційної сталі на різних стадіях навантаження:

- 1 – передруйнівна стадія;
- 2 – початок утворення мікротріщин;
- 3 – пружна область

Це відкриває можливість діагностування появи розвитку небезпечних з точки зору руйнування металевих конструкцій за рахунок зміни їх віброакустичних характеристик, що особливо є актуальним для матеріалів, малоприсаєднаних для діагностування методом акустичної емісії через дуже велике згасання ультразвукових хвиль у їх тілі.

Для цього методами прямих досліджень необхідно встановити чіткий зв'язок між стадією навантаження та виникненням і розвитком дефекта. Особливо це актуальним для стадій до критичних навантажень, коли тільки з'являються передумови появи небезпечних магістральних дефектів.

Для проведення мікроструктурних досліджень обрано нержавіючу сталь 12Х18 Н10Т 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 30х3х2 мм, які піддавалися знакозмінним навантаженням. Ці навантаження не перевищували значень 50-60 МПа. (межа міцності цієї сталі складає 520 МПа, межа пластичності – 200 МПа). Металографічні дослідження виконувалися за допомогою металографічного мікроскопа МИМ-8.

Структурні дослідження виконувалися методом тонких фольг «на просвічування» на електронному мікроскопі TESLABS540.

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.

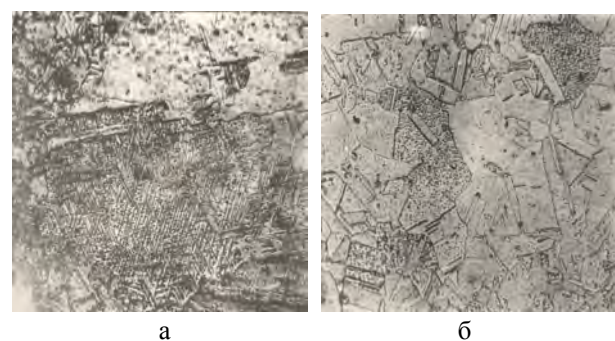


Рис. 2. Структури поверхонь зразків:
а – після 30 тис. циклів навантажень (x230);
б – вихідний стан

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.

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

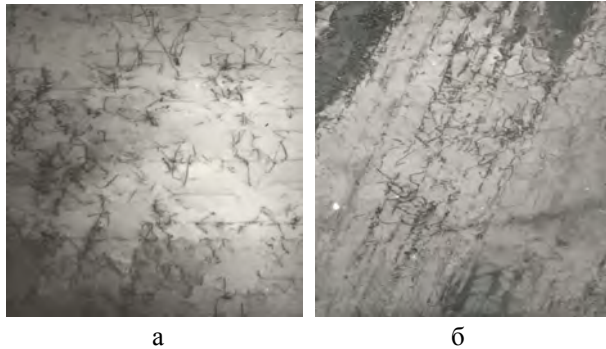


Рис. 3. Зміна дислокаційної структури зразків: а – вихідний стан; б – після 30 тис. циклів ($\times 10000$)

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).

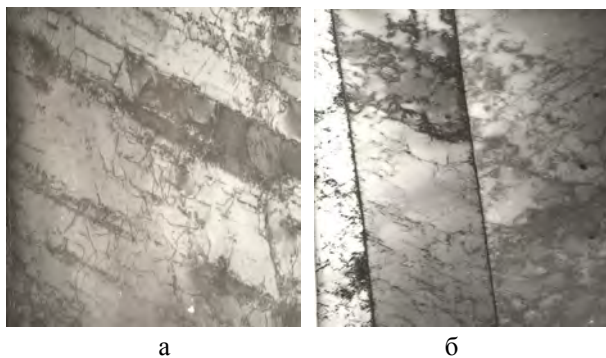


Рис. 4. Поява (а) і розвиток (б) деформації за рахунок процесу двійникування ($\times 10000$)

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 поодинокі 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.

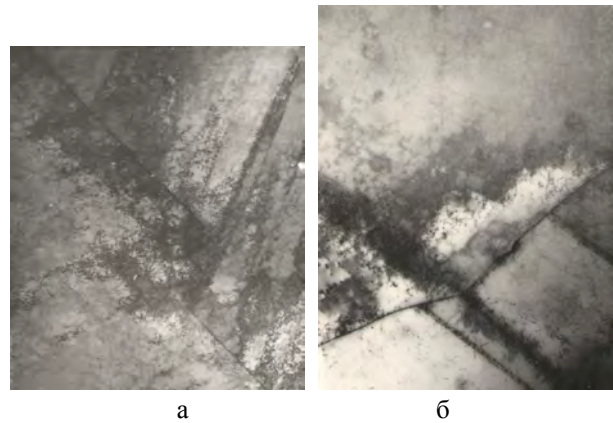


Рис. 5. Дислокаційна структура зразків на границях зерен: а – накопичення дислокацій та границях; б – насичення, яке веде до прориву стінки зерна ($\times 10000$)

Прямі спостереження динаміки розвитку пластичної деформації до появи мікротріщин дає змогу порівняти фактичний стан металеві конструкції з її віброакустичними характеристиками. Це відкриває можливість 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 уявляється 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 квази-рупное 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. Мониторинг будівельних конструкцій АЕС. Загальні положення. – Чинний від 27.03.2007 розпор. ДП НАЕК „Енергоатом” № 257).

8. Ультразвуковой метод неруйнівного контролю температурных полів і термічних напруг в корпусах ядерних реакторів типу 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.

Надійшла до редколегії 15.07.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

СИСТЕМА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ ДИАГНОСТИКИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И МЕХАНИЗМ ЗАРОЖДЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Б.Д. Халмуратов, В.А. Глива, В.М. Макаренко

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 наблюдались 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; мониторинг; дислокационная структура; конструкционные материалы; виброакустические характеристики.

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

B.D. Khalmuradov, V.A. Gliva, V.M. Makarenko

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 are obtained typical dislocation structure in the initial state, and the different amounts of loading cycles. In particular orderly redistribution of dislocations were 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 vibroacoustic) 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.