

УДК 539.421:620.179.17

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ЗМІН СПЛАВУ АМГ6 ЗА РАХУНОК ТЕРМІЧНИХ ВПЛИВІВ ТА ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ**В. А. Глива**

Національний авіаційний університет

просп. космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03058, Україна. E-mail: larlevch@ukr.net

Дослідження структурних змін сплаву АМГ6 у результаті термічних та деформаційних впливів показали, що відпал дефектів структури та коагуляція частинок другої фази призводить до немонотонної залежності параметрів акустичної емісії від часу нагрівання. Виявлено накопичення дислокації з великою щільністю на границях зерен, що відбувається в результаті знакозмінних навантажень далеких від критичних значень. Це є причиною формування смуг дислокацій великої щільності, що призводить до зародження мікротріщини і різкого зростання інтенсивності акустичної емісії. Наведені неоднозначності вказують на складний характер генерації сигналів акустичної емісії та можливість раптових змін їх інтенсивності без критичних зрушень у матеріалі. Отримані результати слід враховувати при впровадженні неруйнівного контролю стану металевих конструкцій.

Ключові слова: структура, сплав, деформація, емісія, дислокація, мікротріщина.**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СПЛАВА АМГ6 ЗА СЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ****В. А. Глива**

Национальный авиационный университет

просп. космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03058, Украина. E-mail: larlevch@ukr.net

Исследование структурных изменений сплава АМГ6 в результате термических и деформационных воздействий показали, что отжиг дефектов структуры и коагуляция частиц второй фазы приводит к немонотонной зависимости параметров акустической эмиссии от времени нагрева. Вывявлено накопление дислокации с большой плотностью на границах зерен, что происходит в результате знакопеременных нагрузок далеких от критических значений. Это является причиной формирования полос дислокаций большой плотности, что приводит к зарождению микротрещины и резкого роста интенсивности акустической эмиссии. Приведенные неоднозначности указывают на сложный характер генерации сигналов акустической эмиссии и возможность внезапных изменений их интенсивности без критических сдвигов в материале. Полученные результаты следует учитывать при внедрении неразрушающего контроля состояния металлических конструкций.

Ключевые слова: структура, сплав, деформация, эмиссия, дислокация, микротрещина.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Не дивлячись на велику кількість робіт, присвячених дослідженню структурних зрушень у різних конструкційних матеріалах, які відбуваються внаслідок нагрівання та деформацій різного ступеня, деякі питання залишаються не з'ясованими. У першу чергу це стосується сплавів обмеженого використання, але практичного значущих. До них належать алюмінієвий сплав АМГ6, з якого виготовляються, наприклад, паливні баки та трубопроводи літальних апаратів. Перевагою цього сплаву є придатність до глибокої штамповки у холодному стані, що значно здешевлює виробництво.

Мета роботи – визначення структурних змін сплаву АМГ6 внаслідок деформації і термічної обробки та їх зв'язок з акустичними характеристиками матеріалу.

МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Як зазначалося, проблематика структурних змін та тріщиноутворення за рахунок термічних впливів та деформацій досить добро досліджена. Результати наведено як у закордонних [1, 2], так і у вітчизняних [3, 4] ґрунтовних дослідженнях. При цьому розглядаються як мікро-, так і макропоказники.

У роботі [5] досліджено динаміку зародження мікротріщин методами растрової електронної мікро-

скопії *in situ* та акустичної емісії. Втім ці дослідження виконувалися на модельному полімерному однорідному матеріалі, що не завжди прийнятне для матеріалів з наявністю кількох фаз.

Роботу [6] присвячено дослідженню структурних змін у магнієвому сплаві МА 14, який широко використовується у авіаційній галузі, під впливом термічної обробки та гідропресування (гідроекструзії). Отримані авторами результати дозволяють дійти висновку, що підвищення міцнісних характеристик досягається за рахунок змін у структурі та фазовому складі сплавів під впливом деформаційних та температурних факторів. Такі висновки зроблено за результатами металографічного аналізу.

Втім значний інтерес становлять зміни, які відбуваються у внутрішніх шарах матеріалів, що доцільно робити методом прямого спостереження – електронної мікроскопії. Його бажано поєднати з дослідженнями за допомогою акустичної емісії. Для цього є кілька причин – як чисто наукових, так і прикладних. Метод акустичної емісії, зокрема для сплаву АМГ6, добре опрацьований [7, 8], сигнали акустичної емісії при його деформації мають досить великі амплітуди, що спрощує їх відокремлення від шумів вимірювального тракту.

Встановлення кореляції між структурними змінами та сигналами (сумарної кількості імпульсів) акустичної емісії має практичне значення для моніторингу стану реальних конструктивних елементів у процесі їх експлуатації.

Відомо, що параметри акустичної емісії (активність, амплітуда сигналів та сумарна кількість імпульсів під час деформації) залежать від температури та часу старіння різних алюмінієвих сплавів та сплавів на основі магнію, а також від розмірів та кількості частинок другої фази і вкраплень. При цьому внесок останніх у згадані параметри може бути неоднозначним. Тому метод акустичної емісії не тільки придатний для дослідження кінетики повернення механічних властивостей при старінні алюмінієвих сплавів, які не зміцнюються під час термічної обробки, а й має практичне значення як для вдосконалення процесів термічної обробки і пошуку її оптимальних режимів, так і для діагностування зародження мікро- і макродефектів.

Для дослідження виготовлялися пласкі зразки з розмірами робочої частини 30x3x2 мм, які попередньо відпалювалися за 623 К упродовж 2 год.

Випробування на розтяг здійснювалися на пристрої ИМАШ 20-78 зі швидкістю $1,5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ до $\epsilon = 4\%$. Одночасно виконувалася реєстрація активності, амплітуди сигналів акустичної емісії та сумарної кількості імпульсів за час деформації. Для реєстрації сигналів акустичної емісії використовувалися широко смугові п'єзоелектричні датчики. Чутливість апаратури була на рівні 15 мкВ.

Після деформації на 4 % зразки повторно відпалювалися за тієї ж температури 623 К, але упродовж різного часу - від 2 хв. до 2 год. Після цього різні партії зразків знов розтягувалися з записуванням акустоemisійних параметрів.

Структурні дослідження виконувалися методом тонких фольг «на просвічування» за допомогою електронного мікроскопу Tesla BS-540.

За одночасної витримки відпалювалася партія зразків не менше за 5 шт. Їх властивості через низку випадкових факторів можуть дещо відрізнятися один від одного, тому спостерігався деякий розкид сумарної кількості імпульсів акустичної емісії за час деформації. Тому, на нашу думку, найбільш коректною характеристикою для оцінки відновлення акустичної емісії після відпалу попередньо деформованих зразків є величина:

$$K = N_t / N_0,$$

де N_0 – сумарна кількість імпульсів акустичної емісії, отримана за попередньої деформації зразків до заданого рівня деформації; N_t – той же параметр, але зареєстрований після ізотермічних відпалів розтягнутих на 4 % зразків.

Очевидно, що K характеризує частку сигналів акустичної емісії, що з'явилися після відпалу.

Графік залежності величини K від часу повторного відпалу представлено на рис. 1.

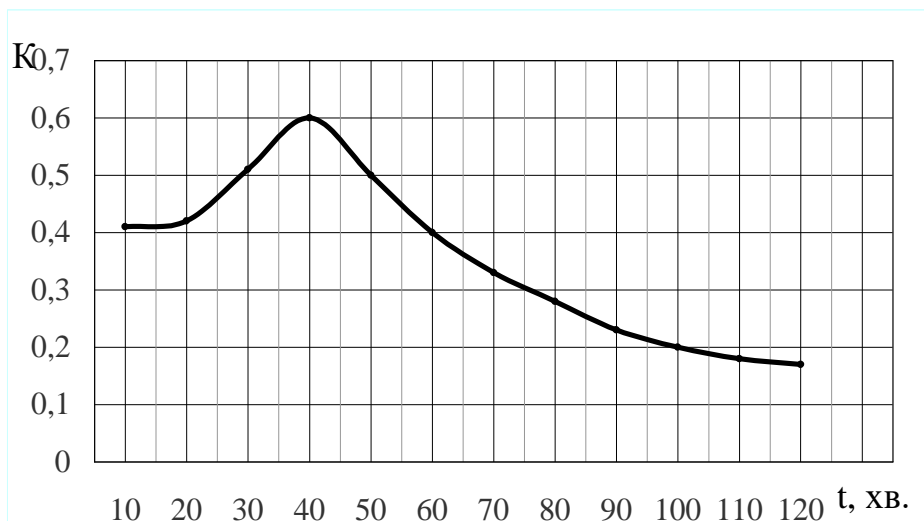
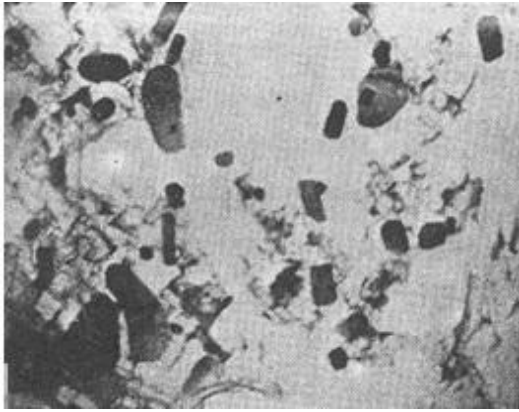


Рисунок 1 – Залежність відносної кількості сигналів акустичної емісії, як з'явилися після відпалу, від часу відпалу за 623 К при повторній деформації зразків

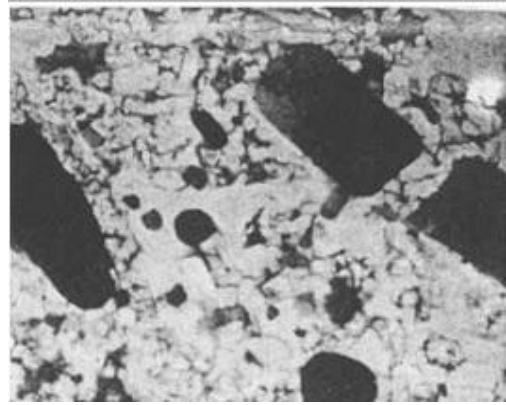
Отримана залежність свідчить, що спочатку, зі збільшенням часу, акустична емісія збільшується, що, на нашу думку, пов'язане зі зниженням щільності лінійних і точкових дефектів та збільшенням у результаті цих процесів довжин вільного пробігу дислокацій, а також швидкості генерації рухомих дислокацій.

Але одночасно з відпалом дефектів зі збільшенням часу витримки зразків відбувається процес коагуляції частинок β -фази - Al_3Mg_2 .

Електронно-мікроскопічні дослідження свідчать, що великі частинки другої фази (діаметром $d > 1$ мкм) зі збільшенням часу відпалу значно збільшуються у розмірах (рис. 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Структура сплаву АМг6 після деформації на 4 % та наступного відпалу за 623 К:
а – 2 хв, б – 120 хв. ($\times 8000$)

Дрібні частинки ($d < 0,3$ мкм) практично не змінюються, проте вони також є бар'єрами для дислокацій, що рухаються, які можуть долатися, наприклад, за механізмом Орована.

При цьому акт подолання перешкоди може бути одним з джерел акустичної емісії, викликаним анігіляцією ділянок дислокацій за утворення дислокаційної петлі навколо частинок [9].

З іншого боку, великі частинки є ефективними стопорами для дислокацій, що істотно обмежує довжину їх вільного пробігу. Саме тому, поблизу таких частинок виникають істотні поля внутрішніх напруженостей, а їх релаксація є основним джерелом акустичного випромінювання.

Таким чином, одночасне протікання двох таких процесів, як відпал лінійних і точкових дефектів та коагуляція частинок другої фази призводить до складної залежності параметрів акустичної емісії від

часу відпалу попередньо продеформованих зразків. На початковому етапі відбувається інтенсивний перерозподіл та зниження щільності дефектів, що утворилися у процесі попередньої деформації, і рівень акустичної емісії зростає. Зі збільшенням часу відпалу головним механізмом виникнення акустичної емісії є збільшення розмірів частинок другої фази. На цій стадії суттєвим виявляється ефект зменшення питомої площі границь, не проникнених для дислокацій, тобто параметра, який прямо пропорційний інтенсивності акустичної емісії.

Відомо, що акустичне випромінювання з'являється набагато раніше зародження та розвитку макротріщини [10]. Під час пластичної деформації відбувається перерозподіл щільності дислокацій та їх накопичення на границях зерен (рис. 3а).



а)



б)

Рисунок 3 – Дислокаційна структура біля границь зерен на стадіях незворотної деформації ($\times 12000$)

За значних навантажень формуються смуги з дуже високими щільностями дислокацій та настає стадія формування мікротріщини (рис. 36). Саме ці процеси супроводжуються значним зростанням інтенсивності сигналів акустичної емісії. Таким чином, різке та стрибкоподібне підвищення акустоемісійної активності свідчить про початок зародження мікротріщин, критична кількість яких у локальній області призводить до появи і розвитку макродефектів. Цей факт можна використовувати для моніторингу стану металевих конструкцій на докритичних стадіях механічних навантажень.

Але для отримання достовірних даних щодо появи та розвитку небезпечних процесів методами неруйнівного контролю (акустичної емісії, віброакустичного тощо) необхідне врахування низки явищ у конструкційних матеріалах. Зокрема, щодо розглянутого сплаву, особливостями структур алюміній-магній є їх знеміцнювання за витримки при нормальних умовах та короточасних нагріваннях, притаманних процесам виготовлення виробів. Для стабілізації механічних властивостей таких сплавів використовується короточасне нагрівання вихідного матеріалу до температур 120–180 °С. Але, як було встановлено, за температур до 350 °С відбуваються істотні структурні зміни, що веде до зниження меж плинності та міцності. При цьому вплив нагрівання за цих температур більш впливає на знеміцнення за межею плинності. Мікроструктурні дослідження свідчать, що нагрівання до температур 300–350 °С супроводжуються не тільки протіканням процесів повернення, а й рекристалізації, що призводить до значного зниження міцнісних характеристик та підвищення пластичності сплаву. Це пояснюється тим, що за високих для даного матеріалу температур навіть за незначних деформацій зростає інтенсивність накопичення дислокацій на границях зерен (наприклад, як на рис. 3).

У таких умовах необхідно враховувати як зростання щільності, так і анігіляцію дислокацій навіть в умовах їх малої рухомості. У загальному випадку слід також враховувати залежності енергій активізації від напружень й орієнтацій осей деформацій.

Важливим аспектом для організації моніторингу фізичного стану конкретної конструкції є інформація про зернистість матеріалу. Відомо, що ефективним методом підвищення механічних властивостей сплавів є створення дрібнозернистої структури, яка сприяє появі ефекту надпластичності. Очевидно, що у таких умовах характер акустичної емісії та вібраційні характеристики конструкції за різних навантажень буде суттєво відрізнятися. Наприклад, якщо одночасне або знакозмінне поперечне навантаження на металоконструкцію не перевищує попереднє, то сигнали акустичної емісії відсутні, або мають випадковий характер (ефект Кайзера).

За структурних змін матеріалу внаслідок термічних та механічних впливів поріг появи таких сигналів може істотно зсуватися. Так, для мікрокристалічного сплаву АМг6 порівняно зі сплавом у стані постачання спостерігається при нормальних умовах одночасне підвищення міцності та пластичності.

Щодо появи та розвитку мікротріщин та їх розвиток у макротріщину, то доцільно визначити структурні зміни у сплаві, які передують такому процесу. Попередні дослідження показали, що таким процесом може бути деформація за механізмом двійникування, що необхідно зареєструвати методами прямого спостереження, наприклад, електронної мікроскопії. Важливим уявляється також визначення та аналіз стадії взаємодії мікротріщин та формування магістрального дефекту.

ВИСНОВКИ. Термічні впливи на попередньо деформовані сплави АМг6 призводить до незворотних структурних змін внаслідок зростання розмірів частинок другої фази.

Температурні і деформаційні процеси неоднозначно впливають на інтенсивність акустичної емісії, що обумовлене одночасним відпалом лінійних і точкових дефектів та коагуляцією частинок другої фази.

Немонотонність залежності акустичної емісії від часу термічного впливу необхідно враховувати при здійсненні контролю фізичного стану металевих конструкцій: зростання акустичної емісії не завжди свідчить про критичні зміни у структурі матеріалу.

Різне зростання інтенсивності сигналів акустичної емісії під час зародження мікротріщин внаслідок накопичення та перерозподілу дислокацій на границях зерен не свідчить про незворотність процесу дефектоутворення, але повинне враховуватися з огляду на можливість формування макродефекту за появи великої кількості мікродефектів у локальній області. Це потребує отримання та накопичення експериментальних даних для кожного конкретного конструкційного матеріалу.

Перспективним уявляється визначення межі критичності термомеханічних впливів з точки зору тріщиноутворення у металевих конструкціях спеціального призначення та формування відповідної інформаційної бази.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dynamic yield and tensile strength of aluminum single crystals at temperatures up to the melting point / G.I. Kanel, S.V. Razorenov, K. Baumung, J. Singer // *Journal of Appl. Phys.* – 2011. – V. 90, № 1. P. 136–143.
2. Корягин Ю.Д. Разупрочнение нагартованного сплава АМг6 при скоростном нагреве в интервале температур 100...300 °С // *Вестник ЮУрГУ.* – 2012. – № 15. – С. 108–111.
3. Скальський В.Р., Андрейків О.Е. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Видавництво Львів. Нац. університету, 2006. – 330 с.
4. Кравцов М.К., Оболенская Т.А., Безуглый С.Г. Образование и распространение усталостных трещин // *Машинобудування.* – 2010. – № 5. – С. 151–159.
5. Лековский А.М., Баскин Б.Л. Некоторые аспекты зарождения и развития трещин микро- и мезомасштаба и квазиупругое разрушение однородных материалов // *Физика твердого тела.* – 2011. – т. 56. – Вып. 6. – С. 1157–1168.

6. Волкова Е. Ф. Влияние деформации и термической обработки на структуру и свойства магниевых сплавов системы Mg-Zn-Zr // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2006. – № 11. – С. 126–132.

7. Неперервний контроль фізичного стану металевих конструкцій / В.А. Глива, О.І. Запорожець, І.М. Ковтун та ін. // *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва.* – 2008. – № 2(2)/2008. – С. 81–86.

8. Глива В.А., Делас М.І., Єременко Б.М. Неперервний акустичний контроль та ідентифікація тріщино утворення в металевих конструкціях //

Управління розвитком складних систем. – 2013. – Вип. 15. – С. 115–118.

9. Исследование процесса отжига сплава АМг6 / А.В. Козлов, Г.И. Прокопенко, В.А. Глива и др. // *Металлофизика.* – 1991. – № 8. – С. 101–104.

10. Розробка методик і засобів виявлення, зародження та розвитку тріщин у великогабаритних об'єктах під впливом навантаження і робочого середовища / В.Р. Скальський, О.М. Сергієнко, Б.О. Оліарник та ін. // *Проблеми ресурсу і безпеки конструкцій, споруд та машин.*: Зб. наук. пр. – К.: ІЕЗ НАН України. – 2006. – С. 48–51.

RESEARCH OF STRUCTURAL CHANGES OF AMG6 ALLOY BY THERMAL EFFECTS AND PLASTIC DEFORMATION

V. Glyva

National Aviation University

prosp. Komarova, 1, Kiev, 03058, Ukraine. E-mail: larlevch@ukr.net

Research of structural changes of AMg6 alloy as a result of thermal effects and deformation had showed that annealing of structural defects and coagulation of particles of the second phase leads to a nonmonotonic dependence of the parameters of acoustic emission from the heating time. Accumulation of dislocations with a high density at the grain boundaries was revealed, which is due to alternating loads are far from critical. That is the reason of the formation of bands of high density dislocations, which leads to the birth of micro-cracks and a sharp increasing intensity of acoustic emission. Listed ambiguities indicate the complexity of the generation of acoustic emission signals and the possibility of sudden changes in their intensity without critical changes in the material. The obtained results should be considered in the implementation of non-destructive monitoring of metal structures. References 10, figures 6.

Key words: structure, alloy, deformation, emissions, dislocations, microcracks.

REFERENCES

1. Kanel, G. I., Razorenov, S. V., Baumung, K., Singer, J. (2011), "Dynamic yield and tensile strength of aluminum single crystals at temperatures up to the melting point", *Journal of Appl. Phys*, vol. 90, no.1, pp. 136–143.

2. Koryagin, Yu. D. (2012), "Softening cold-worked alloy AMg6 during rapid heating in the temperature range 100 ... 300 °C", *Bulletin of South Ural State University*, no. 15, pp. 108–111.

3. Skalskiy, V.R. and Andrejkiv, O.E. (2006), *Otsinka obemnoyi poskodzhenosti materialiv metodom akustichnoyi emisiiyi* [Assessment of volumetric damage of materials by acoustic emission method], Publishing Lviv National University, Lviv, Ukraine.

4. Kravtsov, M.K., Obolenskaia, T.A., Bezuglyi, S.G. (2010), "Education and the spread of fatigue cracks", *Machine building*, no.5, pp. 151–159.

5. Lekovskiy, A.M., Baskin, B.L. (2011), "Some aspects of the birth and development of micro-cracks and destruction of mesoscale and quasi-elastic homogeneous materials", *Solid State Physics*, vol. 56, iss. 6, pp. 1157–1168.

6. Volkova, E.F. (2006), "Effect of deformation and heat processing on structure and properties of magnesium alloys of the Mg-Zn-Zr", *Metal science and heat treatment of metals*, no.11, pp. 126–132.

7. Glyva, V.A., Zaporozhets, O.I., Kovtun, I.M. (2008), "Continuous monitoring of the physical condition of metal structures", *Modern resource-saving technologies of mining production*, no.2, pp. 81–86.

8. Glyva, V.A., Delas, M.I., Eremenko, B.M. (2013), "Continuous acoustic monitoring and identification of crack creation in metal structures", *Management of development of complex systems*, iss. 15, pp. 115–118.

9. Kozlov, A.V., Prokopenko, G.I., Glyva, V.A. (1991), "Research of process of annealing the alloy AMg6", *Metal Physics*, no.8, pp. 101–104.

10. Skalskiy, V.R., Sergienko O.M., Olaiarnyk, B.O. (2006), "Development of techniques and means of detection, origin and development of cracks in bulky objects under the influence of the load and the working environment", *Problems of resource and safety of constructions, facilities and machines: Collection of scientific papers, IEZ NAS of Ukraine*, pp. 48–51.

Стаття надійшла 18.08.2015.