

УДК 534.2

О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА АМг61 ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

© Александр Владимирович Иляхинский, Владимир Митрофанович Родюшкин
Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН", Нижний Новгород, Россия
Pyahinsky-aleks@bk.ru, vlkn2005@yandex.ru

Аннотация. В работе решается практическая задача использования принципов нелинейной акустики при исследовании процесса деформирования образцов сплава АМг61. Для контроля состояния сплава использована поверхностная упругая волна. Процесс распространения упругой волны в деформируемом сплаве АМГ61 в силу нелинейных эффектов сопровождается генерацией удвоенной частоты, как продольной составляющей волны, так и сдвиговой, "запрещенной" уравнениями классической теории упругости. Показано, что нелинейный акустический параметр, наравне с активностью акустической эмиссии, чувствителен к смене механизмов эволюции дефектной структуры. Зафиксировано формирование скачка нелинейности в процессе деформирования сплава АМг61, что может свидетельствовать о перестройки структуры металла.

Ключевые слова: деформирование, сплав АМг61, упругая волна, преобразователь, гармоника, нелинейность, устройство, акустическая эмиссия, измерение, контроль.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00715а; № 19-08-00965а)

ON THE POSSIBILITY OF MONITORING THE DEFORMATION PROCESS OF AMg61 ALLOY BY ACOUSTIC PARAMETERS

© A.V. Pyahinsky, V.M. Rodyushkin
Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia
Pyahinsky-aleks@bk.ru, vlkn2005@yandex.ru

Abstract. The paper solves the practical problem of using the principles of nonlinear acoustics in the study of the deformation process of amg61 alloy samples. A surface elastic wave is used to control the state of the alloy. The process of propagation of an elastic wave in a deformable amg61 alloy due to nonlinear effects is accompanied by the generation of a doubled frequency, both the longitudinal component of the wave and the shear one, which is "forbidden" by the equations of the classical theory of elasticity. It is shown that the nonlinear acoustic parameter, along with the activity of acoustic emission, is sensitive to changes in the mechanisms of evolution of the defective structure. The formation of a non-linearity jump in the process of deformation of the amg61 alloy was recorded, which may indicate a restructuring of the metal structure.

Keywords: deformation, amg61 alloy, elastic wave, transducer, harmonic, nonlinearity, device, acoustic emission, measurement, control.

Acknowledgements. The research was supported by Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-08-00715 a; No. 19-08-00965 a.

Для контроля процесса деформирования металла используются различные акустические эффекты, из них наиболее часто в исследованиях упоминается акустическая эмиссия. Например в работах [1, 2] для изучения конструкционных металлических материалов использована взаимосвязь параметров поврежденности с характеристиками акустической эмиссии. В работе [3] процесс разрушения образца из сплава АМгб контролировался по параметр активности сигналов АЭ, чувствительный к смене механизмов излучения. В [4] при анализе акустической эмиссии, сопровождающей процесс разрушения материалов сделан вывод, что процесс разрушения представляет собой направленную эволюцию дефектной структуры как реакции материалов на приложенное к ним механическое напряжение. По мере исчерпания возможностей сопротивления нагружению на каком-то одном масштабном уровне в системе включаются следующие более высокие масштабные уровни, пока материал не исчерпывает все возможности сопротивления разрушению на всех масштабных уровнях.

Однако в последнее время внимание привлечено к акустическим явлениям, обусловленным нелинейными свойствами деформируемого металла. В твердых телах с дефектами и механическими напряжениями наряду с нелинейностью сил межмолекулярного взаимодействия (классическая нелинейность) проявляется структурная (неклассическая) упругая нелинейность, приводящая к нелинейной связи между механическим напряжением и деформацией. Нелинейные акустические эффекты в твердом теле при малых деформациях незначительны, поэтому в подавляющем большинстве работ описываются квадратичными поправками, ответственными за генерацию второй акустической гармоники [5]. Во многих работах [6-11] наблюдаемые нелинейные эффекты не могут быть объяснены в рамках классической пятиконстантной теории упругости. Эти эффекты объясняются не столько молекулярной структурой среды, сколько наличием в исследуемых образцах структурной нелинейности, обусловленной дефектной структурой исследуемого материала или нелинейной упругостью границ зерен, контактов и дефектных включений. Аномально высокая структурная нелинейность характерна для тел, обладающих микроструктурой или дефектами сплошности (трещины, поры, отслоения и т. п.). Такая структурная нелинейность, возможные механизмы которой рассмотрены в [12], может на несколько порядков превышать классическую упругую нелинейность [13]. Уравнения упруго - пластической среды, описывающие процесс накопления структурных повреждений [14,15], наглядно демонстрируют, что наличие даже малых пластических деформаций приводит к появлению удвоенной частоты (второй гармоники) в спектре сдвиговой волны, распространяющейся в материале. В [16] получены уравнения, описывающие динамические процессы в материалах, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию. Показано, что при распространении в таком материале сдвиговой волны появляется квадратичная нелинейность, приводящая к возможности генерации сдвиговой волны удвоенной частоты, "запрещенной" уравнениями классической теории упругости. В [10] описана генерация второй гармоники при зондировании сред со структурной нелинейностью, которая обусловлена дефектами.

Результаты исследований в упомянутых работах предполагают, что нелинейные эффекты могут служить источником информации о структуре твердого тела и могут быть использованы при создании новых методов неразрушающего контроля различных материалов и конструкций.

Для ответа на практический вопрос: как принципы нелинейной акустики могут быть использованы при оценке состояния материала, в работе экспериментально исследовано наряду с явлением акустической эмиссии, поведение нелинейного акустического параметра (НАП) при деформировании образцов сплава АМГб1.

Изучение взаимосвязи НАП со стадийностью пластической деформации сплава АМГб1 проводилось с использованием поверхностных волн Рэлея. Применение такого типа зондирующих волн обусловлено возможностью их практического использования для ультразвукового контроля деталей и заготовок любой формы [17].

Поверхностные акустические волны (ПАВ) имеет эллиптическую поляризацию и содержит две упругие компоненты: поперечную и продольную. Процесс распространения упругой волны в деформируемом сплаве АМГб1 в силу нелинейных эффектов сопровождается генерацией удвоенной частоты, как продольной составляющей волны, так и сдвиговой, "запрещенной" уравнениями классической теории упругости.

Отсюда следует, что экспериментально измеренное отношение амплитуд первой и второй гармоник в течении всего процесса деформирования будет характеризовать зависимость НАП от структурного состояния металла образца. Для этого использовать стандартную процедуру ультразвукового контроля, основанную на возбуждении короткого импульса упругих волн проблематично. Изначальный спектр таких импульсов маскирует информационные составляющие в прошедшем среде сигнале. В инженерной практике принимают (в первом приближении независимо от формы сигнала): $\Delta t \cdot \Delta f \approx 1$. То есть, что чем длиннее импульс - Δt , тем ширина его спектра частот - Δf уже. Поэтому проблема экспериментального обоснования спектрального метода акустического зондирования состояла в генерации сигнала с узкой полосой спектра и низким уровнем шумов. Решение этих проблем потребовало создания специализированного экспериментального устройства [19], позволяющее измерять отношение амплитуды первой и второй гармоник.

Работа устройства заключается в следующем. По поступающей от компьютера по USB команде микроконтроллер запускает генератор, который формирует радиоимпульс с частотой заполнения 1 МГц и длительностью 3,5 мс, сигнал подается на пьезоизлучатель, имеющий резонансную частоту 1 МГц. Спектральные характеристики исходного сигнала, измеренные прибором DPO4032 фирмы Tektronix, приведены на рис.1.

После взаимодействия со средой при прохождении ПАВ в деформируемом образце, сигнал фиксируется пьезоприёмником, имеющим резонансную частоту 2 МГц. Сигнал с приемного ПЭП поступает на усилитель, имеющим, для расширения динамического диапазона, завал АЧХ на частоте 1 МГц по сравнению с 2 МГц около 20 дБ, затем сигнал оцифровывается 16-разрядным АЦП с частотой квантования 5 МГц и запоминается в буферном ОЗУ. После этого микроконтроллер выполняет спектральный анализ полученного сигнала и вычисляет отношение амплитуд спектральных компонент на частотах 2 МГц и 1 МГц. Результат по USB передается в компьютер.

Следует заметить, что исследования нелинейности, как правило, проводятся в лабораторных условиях [20-22] удовлетворяя интерес исследователей, в то время как используемое представленное экспериментальное устройство позволяет исследовать металл на реальных конструкциях, что переводит его в ранг средств неразрушающего контроля.

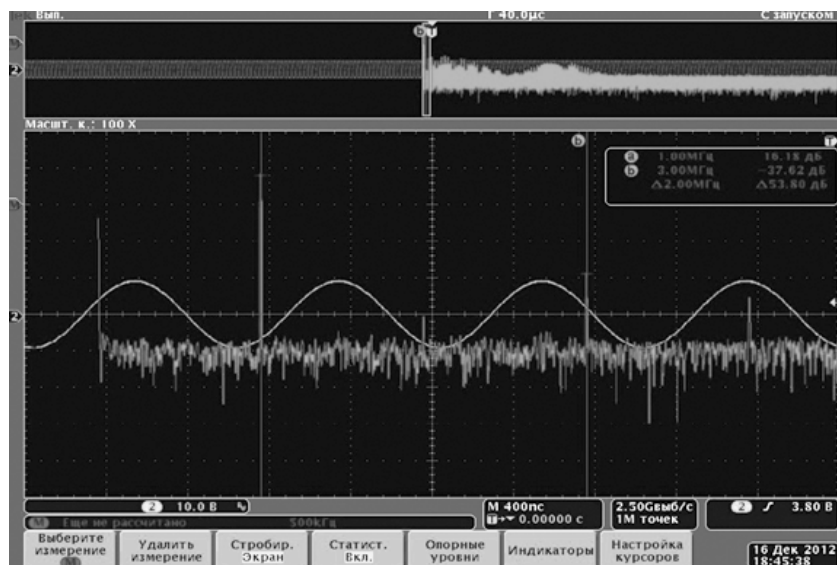


Рис.1. Спектральные характеристики сигнала: уровень второй гармоники -83дБ, уровень третьей -53дБ

Экспериментальные исследования проводились на образцах сплава АМг61. Одноосная упруго - пластическая деформация материала создавалось путем испытания на растяжение плоских пропорциональных образцов тип 1 № 21 по ГОСТ 1497 толщиной 6 мм с шириной рабочей части 20 мм .

Деформирование образцов проводилось на универсальной испытательной машине фирмы Tinius Ollsen Ltd, модель H100KU со скоростью перемещения активного захвата 5 мм/мин, позволяющее изменять приложенную к образцу силу по заданной программе. Предельная нагрузка, реализуемая на машине - 100 000 Н; погрешность измерения нагрузки 0.5%; скорость траверсы 0,001-500 мм/мин.; разрешающая способность системы измерения перемещения траверсы/деформации образца 0,001 мм жесткость рамы при нормальных точках нагружения не менее 470 кН/мм. Величина силы и деформации измерялась электронным датчиком, ходе эксперимента поступала в компьютер для ее хранения и последующего анализа.

В процессе деформирования широкополосным датчиком акустической эмиссии фиксировались изменения уровня акустической активности, вызванной перестройкой структуры АМг6. Для наблюдения за упругими импульсами АЭ использовался цифровой осциллограф.

Одновременно с упругими импульсами АЭ при деформировании образцов контролировался НАП. Следует заметить, что генерация в зондирующем сигнале ПАВ второй гармоники могут быть обусловлена различными причинами: нелинейностью пьезокерамических элементов в преобразователях; контактной нелинейностью; нелинейностью, связанной с ангармонизмом межатомного взаимодействия и, наконец, структурной нелинейностью в деформируемом металле. В процессе деформирования металла первые три причины генерации сигнала второй гармоники неизменны. Поэтому можно считать, что наблюдаемые флуктуации НАП в основном определяется структурной нелинейностью металла.

На рис. 2 приведены диаграмма нагружения, поведение амплитуды акустической эмиссии и НАП при деформировании образцов сплава АМг61.

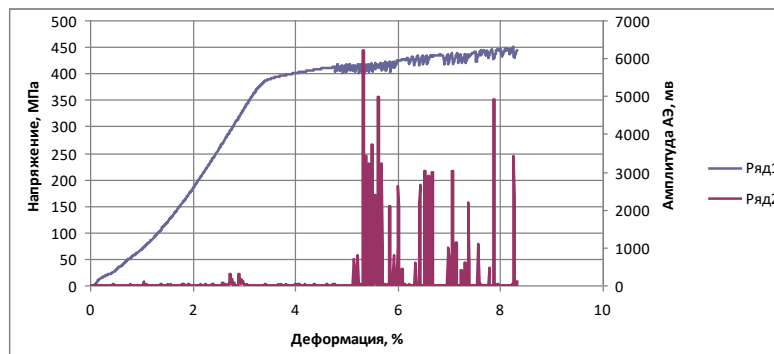


Рис.2. Поведение амплитуды акустической эмиссии при деформировании образцов сплава АМгб1

Приведенные данные демонстрируют увеличение измеренной акустической эмиссии в стадии предразрушения, что согласуется с результатами работы [3]. Однако на ранних стадия упругопластического деформирования проследить процесс разрушения по активности сигналов АЭ на примере образца из сплава АМгб затруднительно.

На рис. 3 представлена графики поведения НАП при деформировании образцов сплава АМгб1.

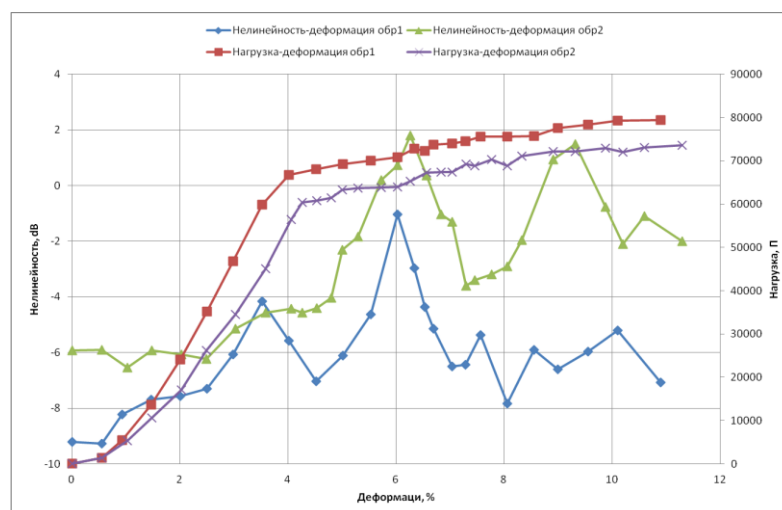


Рис.3. Поведение НАП при деформировании образцов сплава АМгб1.

Полученные данные свидетельствуют, что на ранних стадия упругопластического деформирования НАП более чувствителен, чем параметр АЭ, при этом флуктуации активности АЭ коррелируют с поведением НАП, что косвенно говорит в пользу адекватности данных о НАП при контроле за процессом деформирования АМгб1. Следовательно, экспериментально зафиксированное формирование скачков нелинейности в процессе деформирования сплава АМгб1 может быть использовано как свидетельство перестройки структуры металла [23,24].

Как видно из приведенных результатов, НАП является, наравне с параметрами акустической эмиссии, по которым судят о нахождении металла в предразрывном состоянии,

чувствительным к смене механизмов излучения и может быть полезной для моделей прогнозирования ресурса.

Список литературы

1. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б. Об аналогии акустического и сейсмического режимов на различных стадиях разрушения // Доклады РАН. - 2001. - Т.376, №3. - С. 331-334.
2. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б., Жаркова Н.А., Тютин М.Р., Будуева В.Г. Акустические свойства малоуглеродистой стали на различных стадиях разрушения // Деформация и разрушение материалов. - 2005. - №4. - С.35-41.
3. Тютин М.Р. Применение b - параметра акустической эмиссии как критерия разрушения материалов // Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 10-13 ноября 2015 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТРАН, 2015. - С.112-113.
4. Гиляров В.Л., Слуцкер А.И., Корсуков В.Е. Пространственное и временное самоподобие в процессах разрушения и деформирования нагруженных материалов // Структура и свойства перспективных металлов и сплавов / тезисы докладов XI международного семинара «Актуальные проблемы прочности» (30.05-4.10 2002 г. Великий Новгород). - Великий Новгород, 2002. - С.10.
5. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. - М.: Наука, 1966. - 309 с.
6. Коробов А.И., Агафонов А.А., Изосимова М.Ю. Нелинейные упругие волны в твердотельном изотропном клине с дефектами // Журнал технической физики. - 2018. - Т. 88, № 3. - С. 385-391.
7. Баллад Е. М., Коршак Б. А., Можаяев В. Г., Солодов И. Ю. Генерация третьей гармоники и акустическая нелинейность высших порядков в твердых телах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2001. - № 6. - С.44-48
8. Конюхов Б.А., Шалашов Г.М. Об эффектах третьего приближения при распространении упругих волн в изотропных твердых телах // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1974. - № 4. - С. 125–132.
9. Асаинов А.Ф., Ко Сел Лен, Солодов И.Ю. Нелинейное рассеяние поверхностных акустических волн механическими дефектами твердого тела //Акустический журнал. - 1993. - Т.39, № 4. - С.592-597.
10. Назаров В.Е., Сутин А.М. Генерация гармоник при распространении упругих волн в твердых нелинейных средах // Акустический журнал. - 1989. - Т. 35, № 4. - С. 711-716.
11. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Турна В., Гусев В.Э., Кастаньеде Б. Экспериментальное исследование нелинейных акустических эффектов в зернистых средах // Акустический журнал. - 2005. - Т.51, № 5. - С.633-644.
12. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физических наук. - 2006. - Т.176, № 1. - С.77–95.
13. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Нелинейные явления при распространении упругих волн в твердых телах // Успехи физических наук. - 1970. - Т. 102. - С. 549–586.
14. Бакушев С.В. Продольно-поперечные волны деформаций слабого разрыва // Проблемы прочности и пластичности. - 2014. - Т.76, № 2. - С.114 – 121.
15. Доронин А.М., Ерофеев В.И. Генерация второй гармоники сдвиговой волны в упруго-пластической среде // Письма о материалах. - 2016. - Т. 6, № 2. - С.102-104.

16. Ерофеев В.И., Мишакин В.В., Родюшкин В.М., Шарабанова А.В. Генерация сдвиговых волн удвоенной частоты в материалах, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию // Дефектоскопия. – 2006. - № 4.- С.28-36.
17. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. - М.: Наука, 1981. - 287 с.
18. Ширгина Н.В., Кокшайский А.И., Коробов А.И. Нелинейные упругие явления при распространении акустических волн на плоской шероховатой границе твердых тел // Ученые записки физического факультета московского университета. – 2017. - №4. - 1740802.
19. Ванягин А.В., Родюшкин В.М. Измерение акустической нелинейности повреждённого металла // Измерительная техника. – 2017. - №10. - С.42-44.
20. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И. Неклассические проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // Успехи физических наук. - 2006. - Т.176, № 1. - С.97–102.
21. Мишакин В.В., Родюшкин В.М. «Нелинейность как индикатор преддефектного состояния материала» // Безопасность труда в промышленности. – 2009. - №7. - С.48-53.
22. Руденко О.В., Чинь Ань Ву. «Нелинейные акустические свойства контакта шероховатых поверхностей и возможности акустодиагностики статистических характеристик неровностей» // Акустический журнал. - 1994. - Т.40. - №4. - С.668-672.
23. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмелов К.И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al // Журнал технической физики. - 2000. - Т.70. - №1. - С.52-56.
24. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов. - Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2013. - 324 с.

Дата поступления: 29 мая 2020 г.