

УДК 667.64:678.026

В.Л. Алексенко¹, А.А. Шарко², К.Ю. Юренин¹, С.А. Сметанкин¹, Д.М. Степанчиков²*Херсонская государственная морская академия¹**Херсонский национальный технический университет²***ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СТАЛИ СТЗСП**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по установлению взаимосвязи возникновения сигналов акустической эмиссии (АЭ) с параметрами силового поля при различных стадиях нагружения образцов из стали СтЗсп. Разработаны методика исследований и конструкция образцов, позволяющие исследовать связь параметров нагружения и деформации с моментами возникновения сигналов АЭ. Полученные при нагружении образцов данные АЭ сигналов, сопоставлены с результатами измерений относительной деформации образцов. Обнаружена корреляция возникновения сигналов АЭ с моментами изменения степени деформации материала в функции от приложенного напряжения. Показано, что ответственной за изменение степени деформации стали СтЗсп при одноосном нагружении является низкочастотная часть спектра АЭ. Рассмотрена физическая природа возникновения сигналов АЭ и дискретные модели источников акустической эмиссии в материалах. Доказано, что параметры АЭ, возникающей при деформировании материалов при различных этапах накопления повреждений и развития нагружений, могут служить эффективными характеристиками изменения микроструктуры материалов. Обнаружено, что возникновение сигналов АЭ при деформационных изменениях структуры происходит раньше, чем это фиксируется в результате механических испытаний на одноосное растяжение. Дается объяснение этому явлению, исходя из погрешностей измерений, которая в разрывных испытаниях значительно выше, чем при акустических измерениях. Показано, что АЭ является перспективным направлением исследований процессов деформации и разрушения материалов, позволяющим оценить наступление характерных этапов диаграммы изменения степени деформации от приложенной нагрузки.

Ключевые слова: акустическая эмиссия (АЭ), сигналы, деформация, микроструктура материала, напряжение, измерения.

В.Л. Алексенко, А.А. Шарко, К.Ю. Юренин, С.О. Сметанкин, Д.М. Степанчиков

*Херсонська держана морська академія**Херсонський національний технічний університет***ВПЛИВ СТУПЕНІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ПАРАМЕТРИ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ
СТАЛІ СТЗСП**

В роботі представлені результати експериментальних досліджень по встановленню взаємозв'язку виникнення сигналів акустичної емісії (АЕ) з параметрами силового поля при різних стадіях навантаження зразків із сталі СтЗсп. Розроблені методики дослідження та конструкція зразків, що дозволяють досліджувати зв'язок параметрів навантаження та деформації з моментами виникнення сигналів АЕ. Отримані при навантаженні зразків дані АЕ сигналів, зіставлені з результатами вимірів відносної деформації зразків. Виявлено кореляцію виникнення сигналів АЕ з моментами зміни ступеня деформації матеріалу в функції від прикладеної напруги. Показано, що відповідальною за зміну ступеня деформації сталі СтЗсп при одноосному навантаженні є низькочастотна частина спектра АЕ. Розглядається фізична природа виникнення сигналів АЕ та дискретних моделей джерел акустичної емісії у матеріалах. Доведено, що параметри АЕ, які виникають при деформуванні матеріалів при різних етапах накопичення пошкодження та розвитку навантажень, можуть служити ефективними характеристиками зміни микроструктур матеріалів. Виявлено, що виникнення сигналів АЕ при деформацийних змінах структур відбувається раніше, ніж це фіксується в результаті механічних випробувань на одноосному розтягуванні. Дасться обґрунтування цього явища, виходячи з помилок вимірювань, які в розривних випробуваннях значно вище, ніж при акустичних вимірах. Показано, що АЕ є перспективним напрямком досліджень процесів деформації та руйнування матеріалів, що дозволяє оцінити настання характерних етапів діаграм зміни ступеня деформації від прикладеного навантаження.

Ключові слова: акустична емісія (АЕ), сигнали, деформация, микроструктура матеріалу, напруга, вимірювання.

V.L. Aeksenko, A.A. Sharko, K.Y. Yurenin, S.A. Smetankin, D.M. Stepanchikov

*Kherson State Maritime Academy**Kherson National Technical University***THE INFLUENCE OF DEFORMATION'S DEGREE ON ACOUSTIC EMISSION
SIGNALS' PARAMETERS OF THE STEEL ST3SP**

On the job the experimental researches results for establishing acoustic emissions' signals interaction with force field's parameters under different stages of stress load on steel samples St3sp. The research methods and samples construction were developed. They allow to explore an interaction of stress parameters and deformation with moments of signals AE appearance. The received during stress load of samples AE signals data compared with results of relative samples deformation measurement. It was detected the correlation of appearing AE signals with material's deformation changing stages' moments in function of applied stress. It was shown, that low-cycle AE spectres part during one-axle stress is in charge of steel St3sp deformation's stages changing. It was examined the physical nature of AE signals appearance and

discrete models of acoustic emissions sources in materials. It was proved, that AE parameters, appearing during materials deformation under different stages of damages cumulation and stresses development may be used as effective characteristics of materials' microstructure changing. It was detected, that AE signals' appearance under structures' deformation's changings happens earlier, then it fixes as result of mechanical tests by uniaxial tension. An explanation of this scene is given, basing on measurements' error, which is higher in tearing tests, than during acoustic measurements. It is shown that the AE is a promising direction for studying the processes of deformation and materials' fracture, which makes it possible to evaluate the characteristic steps' onset of the diagram, showing the change in the deformation's degree from the applied load.

Key words: acoustic emission (AE), signals, deformation, materials' microstructure, stress, measurement.

Постановка проблеми. В последнее время наблюдается тенденция роста требований как к конструкционным материалам, так и к методам оценки их надежности и качества. Особое внимание уделяется разработке новых, физически обоснованных, критериев прочности материалов, основанных на всестороннем изучении явлений, лежащих в основе процессов деформации и разрушения. Изучение кинетики деформации материалов связано с необходимостью анализировать силовой отклик материала на внешние растягивающие напряжения. Накопление повреждений при деформации металлов и сплавов в процессах структурной перестройки материалов, протекающих при деформации материалов, сопровождается акустической эмиссией (АЭ). Из-за сложности взаимосвязей структурных параметров и физико-механических характеристик материалов, нельзя при определении их свойств полагаться на априорные представления и теоретические положения об их изменениях в различных условиях эксплуатации. Для подтверждения правильности решений и выработки практических рекомендаций необходимо проведение комплексных экспериментальных исследований деформации материалов при их одноосном нагружении с одновременной регистрации моментов возникновения сигналов АЭ.

Использование инструментария АЭ дает возможность найти неизвестные ранее характеристики структуры материалов, проследить динамику их развития, устойчивость, целостность и обеспечить прогнозирование развития дефектов материала.

Анализ публикации по обозначенной проблеме показывает, что главный интерес исследователей в настоящее время направлен на изучение дефектов структуры материала, определяющих эксплуатационные характеристики изделий [1-6]. Структура материалов при нагружении может быть представлена как сложная система, обладающая свойствами нелинейности, неравновесности и необратимости. Рассмотрение структурных изменений и их влияния на свойства материалов может быть положено в основу механизма деградации сплошности материала на ранних стадиях деформационного процесса [7,8]. Одной из важных практических задач является сопоставление параметров АЭ тем изменениям структуры, которые она сопровождает [9-11].

Целью работы является изучения влияния различной степени деформации стали Ст3 при одноосном растяжении на параметры сигнала акустической эмиссии.

Результаты исследований и их обсуждение. Современные экспериментальные методы материаловедения направлены на визуализацию результатов уровней различных процессов в том числе и разрушения. Недостатки методов заключается в их статичности. Исследовать динамику процессов структурообразования позволяет акустическая эмиссия.

К акустической эмиссии относят класс явлений, при которых распространяющиеся упругие волны порождаются быстрым высвобождением энергии от локальных источников нарушений микроструктуры внутри материала. Метод АЭ чрезвычайно чувствителен к любым изменениям дефектной структуры материалов. Он является интегральным методом. Накопление деформации в условиях механических нагружений обусловлено коллективными дислокационными процессами организации дислокаций в коррелированный ансамбль. В общем случае деформация протекает неоднородно и в процесс поочередно вовлекаются разные области деформируемого материала, в то время как в остальных частях деформация отсутствует.

Для эксперимента была выбрана одна из самых распространенных конструкционных углеродистых сталей Ст3сп. Образцы для испытаний на одноосное растяжение вырезались из листового проката размером (223x37x3) мм. Размеры образцов выбирались из условий обеспечения возможности размещения на недеформируемых участниках образцов акустических датчиков. Для локализации деформации зона предполагаемого разрушения исполнялась в виде галтели. С целью обеспечения надежных захватов образцов в фиксирующих устройствах разрывной машины к образцам в местах их крепления приваривались сухарики размером (38x8x8) мм, для того чтобы не возникали перекосы, и прикладываемая нагрузка действовала по

продольной оси образца. Форма и геометрические размеры образцов, а также мест разрушения при разрывных испытаниях представлены на рис.1.

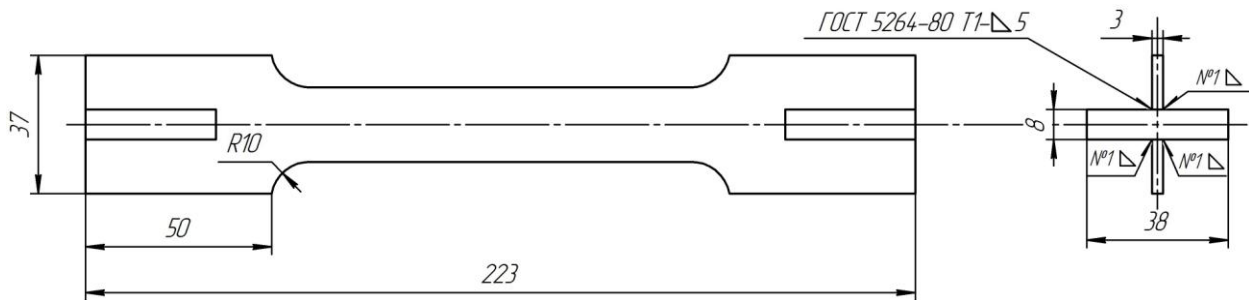


Рис. 1. – Чертеж образца из стали Ст3 для испытаний на одноосное растяжение.

Для снятия напряжений, вызванных механической обработкой, образцы отжигались при температуре 500 °С в течении одного часа.

В качестве контактного материала между преобразователями акустической эмиссии и образцом использовалось трансформаторное масло. В измерительной установке использовались широкополосные акустические датчики к акустико-эмиссионному прибору АФ15. Регистрация сигналов после усиления до 90 Дб выполнялась запоминающим осциллографом RIGOL DS1052E Digital oscilloscope. При этом осуществлялась частотная фильтрация. Ограничения в области низких частот вызваны необходимостью отсеки шумов механического и испытательного оборудования, а в области высоких – необходимостью отсеки электромагнитных наводок. При этом производилась запись сигнала в цифровом формате. Калибровка системы проводилась с помощью имитатора АЭ сигналов.

Неинформативные сигналы акустической эмиссии, вызванные шумами и трением в области захватов разрывной машины, уменьшались за счет использования резиновых прокладок между датчиками АЭ и образцом в струбцине крепления датчиков (рис.2.).

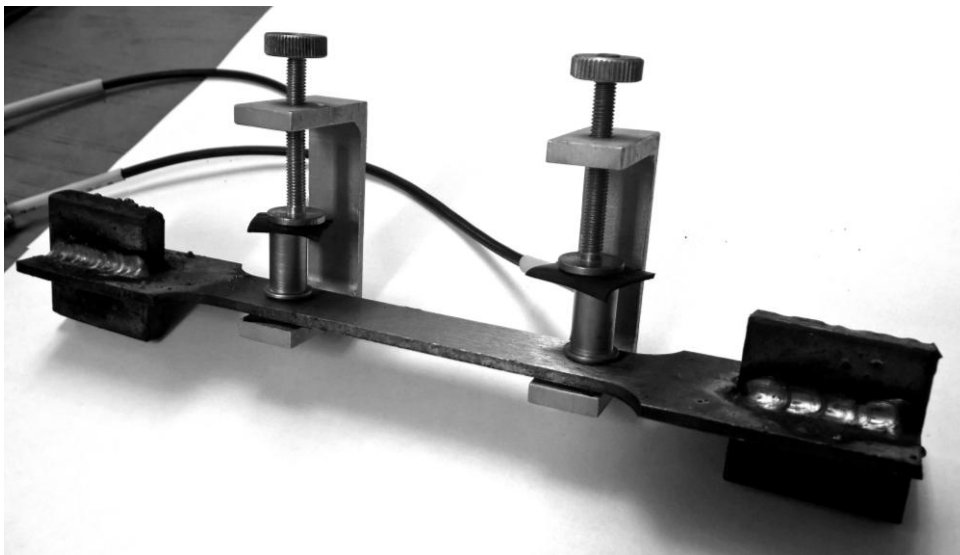


Рис. 2. – Расположение АЭ датчиков при измерениях.

Идентификация структурных особенностей накопления повреждений и разрушения материалов по данным АЭ осуществлялась на основе анализа степени деформации образцов, полученной из испытаний на разрывной машине УМ5. Схема экспериментальной установки для проведения измерений на одноосное нагружение представлена на рис.3.

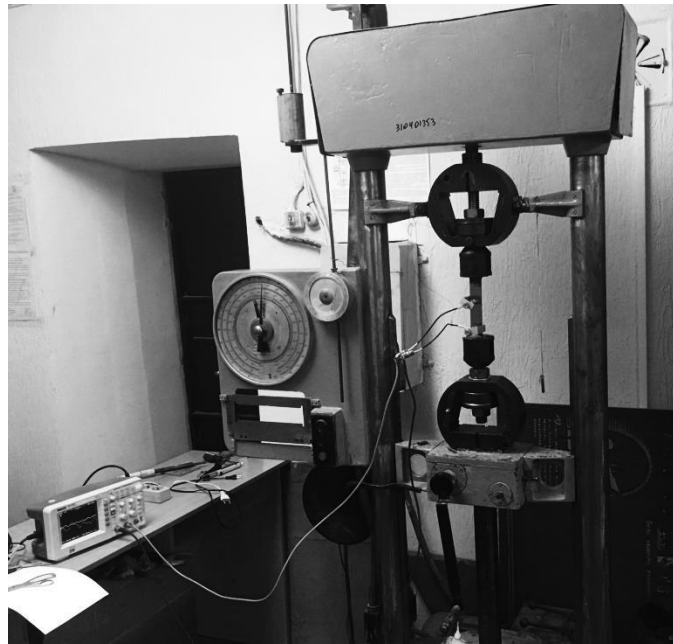


Рис. 3. – Установка для испытаний на одноосное нагружение.

Типичная форма акустического сигнала от двух датчиков акустической эмиссии при АЭ измерениях представлена на рис.4.

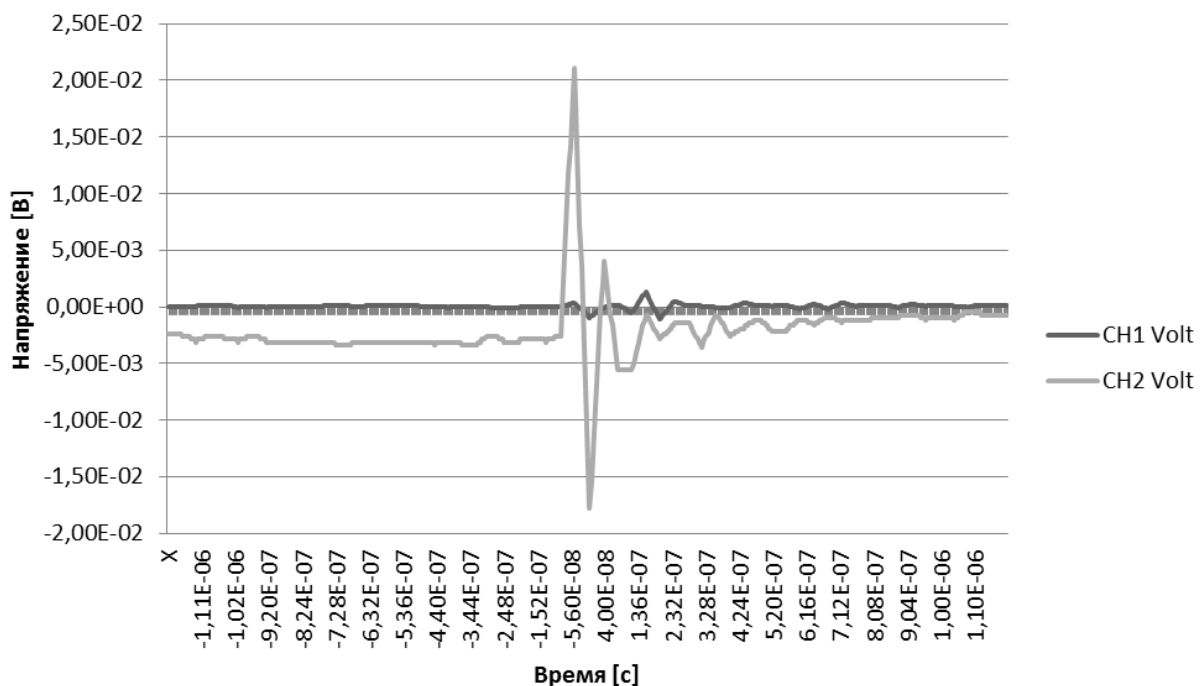


Рис. 4. – Типичный сигнал акустической эмиссии стали Ст3 от двух датчиков.

Сравнение формы АЭ сигнала с данными аналогичных измерений, представленных, например, в [3,10] дает основание заключить о правильности используемой методики, положенной в основу измерений АЭ сигналов. Различия АЭ сигналов от двух датчиков при идентичной нагрузке объясняются несогласованностью длины подводящих проводов между датчиками и усилителем осциллографа.

Фиксация удлинения осуществлялась с помощью рычажного тензометра Гугенбергера с постоянной базой. Тензометр Гугенбергера позволяет измерять деформацию на локальном участке образца. Принцип его работы основан на прямой зависимости линейного удлинения испытуемого

образца от напряжений в его поперечном сечении при действии деформирующей нагрузки. Схема работы прибора представлена на рис. 5.

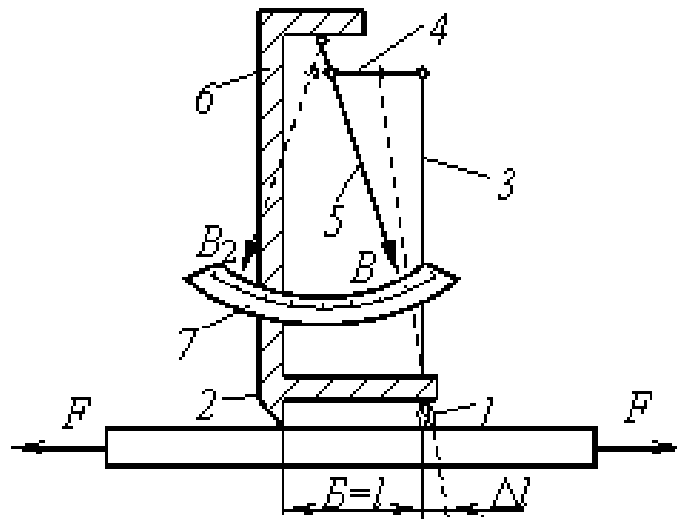


Рис. 5. – Принципиальная схема тензомера Гугенбергера.

В эксперименте с помощью струбинок тензомер прижимался к поверхности образца 1 через две ножевые опоры 2, выполненные в виде призм. Расстояние между ними L определяет базу измерений. Подвижная призма – 3, является одним из концов двухплечевая рычага 4. Соотношение плеч рычажной системы 4 таково, что смещение на $0,001$ мм подвижного ножа 3 смещает конец стрелки 5 на уровне базы прибора 6 по шкале 7 на 1 мм, т.е. действительное перемещение увеличивается в тысячу раз. При базе 20 мм и передаточном числе $1:1000$ цена деления прибора $0,00005$ единиц относительной деформации, а погрешность измерений составляет 15 единиц относительной деформации.

Схема расположения датчиков АЭ и призм тензомера Гугенбергера представлена на рис.6.

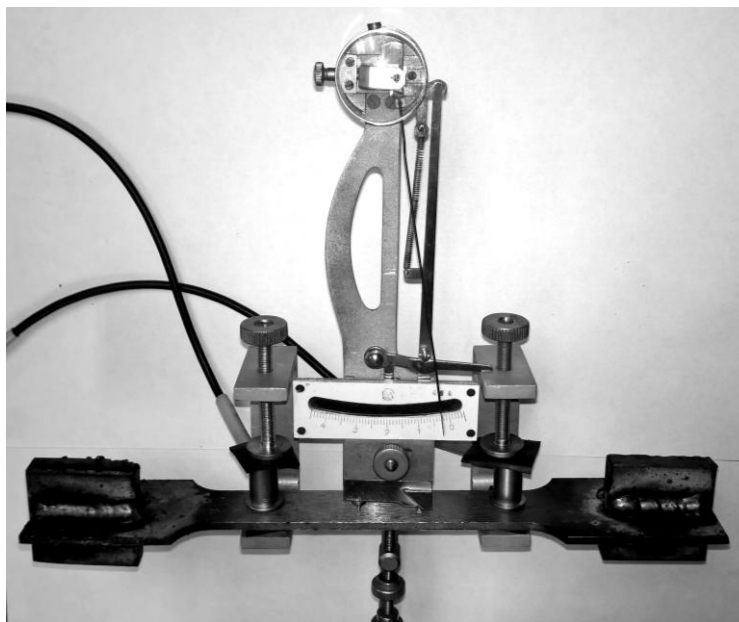


Рис. 6. – Схема расположения акустических датчиков и призм крепления рычажного тензомера Гугенбергера.

Технология измерений относительного удлинения с помощью рычажного тензомера Гугенбергера предусматривает перестановку стрелки прибора при достижении максимально разрешимой относительной деформации образца и суммирования текущих и предыдущих показаний прибора.

Для обеспечения непрерывной записи времени протекания процесса нагружения и фиксации относительной деформации таймер отсчета времени отключался на момент переустановки стрелки тензометра при достижении максимальных значений. Перестановка стрелки тензометра Гугенбергера требовала повторной установки прибора на испытуемом образце для сохранности подвижной призмы ножевой опоры и ее возвращения в исходное состояние при производстве измерений. Возможный уход стрелки прибора от нулевой отметки корректировался регулирующим устройством.

Схема эксперимента была основана на фиксации деформации как функции параметров силового воздействия на материал с синхронной регистрацией моментов возникновения сигналов АЭ (рис.7).



Рис. 7. – Схема информационно-измерительной АЭ системы.

Поскольку уровень сигналов АЭ невысок, возникают проблемы, связанные с выделением полезных сигналов на уровне собственных шумов аппаратуры и распознаванием сигналов АЭ. Для уменьшения собственных шумов нагружающего устройства, вызванных колебаниями двигателя разрывной машины, было предложено нагружение производить вручную. После достижения заданного уровня приложенной нагрузки происходит релаксация напряжений в образце. После установления равновесия производилось дальнейшее увеличение нагрузки с фиксацией измеряемых параметров.

Различие АЭ сигналов от двух датчиков устранялось за счет согласования длины подводящих проводов между датчиком и усилителем осциллографа. Синхронно регистрировались параметры деформирования и моменты возникновения сигналов акустической эмиссии. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Усилие	Показания тензометра	Суммарное значение показаний с перестановкой тензометра	Время измерения	Общее время измерения с перестановкой стрелки тензометра	Механическое напряжение	Степень относительной деформации
Р, кг	DI	ΣDI , мм	t, с	Σt , с	МПа	%
0	0	0	0	0	0,0	0,00
1590	22,5	22,5	0,5	0,5	259,7	0,11

1630	38	60,5	0,5	1	266,2	0,30
1640	65	125,5	0,5	1,5	267,9	0,63
1645	55	180,5	0,5	2	268,7	0,90
1650	50	230,5	0,5	2,5	269,5	1,15
1650	55	285,5	0,5	3	269,5	1,43
1650	45	330,5	0,5	3,5	269,5	1,65
1650	45	375,5	0,5	4	269,5	1,88
1650	44	419,5	0,5	4,5	269,5	2,10
1650	43	462,5	0,5	5	269,5	2,31
1650	23	485,5	1,5	6,5	269,5	2,43
1650	41	526,5	1	7	269,5	2,63
1650	41	567,5	1	8	269,5	2,84
1650	36	603,5	1	9	269,5	3,02
1650	33	636,5	10	10	269,5	3,18
1650	39	675,5	7	17	269,5	3,38
1650	40	715,5	28	45	269,5	3,58
1650	42	757,5	16	61	269,5	3,79
1670	40	797,5	8	69	272,8	3,99
1670	40	837,5	13	82	272,8	4,19
1670	60	897,5	14	96	272,8	4,49
1670	41	938,5	17	113	272,8	4,69
2000	43	981,5	14	127	326,7	4,91
2000	25	1006,5	14	141	326,7	5,03
2000	45	1051,5	12	153	326,7	5,26
2000	48	1099,5	1	154	326,7	5,50
2010	53	1152,5	1	155	328,3	5,76
2040	43	1195,5	1	156	333,2	5,98
2045	44	1239,5	2	158	334,0	6,20
2060	47	1286,5	1	159	336,5	6,43
2070	43	1329,5	1	160	338,1	6,65
2095	43	1372,5	1	161	342,2	6,86
2100	43	1415,5	1	162	343,0	7,08
2100	44	1459,5	1	163	343,0	7,30
2110	41	1500,5	1	164	344,6	7,50
2130	65	1565,5	1	165	347,9	7,83
2130	41	1606,5	1	166	347,9	8,03
2130	41	1647,5	1	167	347,9	8,24
2130	42	1689,5	1	168	347,9	8,45
2130	39	1728,5	1	169	347,9	8,64
2130	45	1773,5	1	170	347,9	8,87
2130	45	1818,5	1	171	347,9	9,09
2140	46	1864,5	34	205	349,5	9,32
2140	43	1907,5	13	218	349,5	9,54
2140	45	1952,5	18	236	349,5	9,76
2140	43	1995,5	17	253	349,5	9,98
2140	44	2039,5	16	269	349,5	10,20

2150	45	2084,5	17	286	351,2	10,42
2160	41	2125,5	14	300	352,8	10,63
2160	42	2167,5	12	312	352,8	10,84
2160	43	2210,5	13	325	352,8	11,05
2170	43	2253,5	1	326	354,4	11,27
2170	43	2296,5	3	329	354,4	11,48
2170	44	2340,5	1	330	354,4	11,70
2170	45	2385,5	3	333	354,4	11,93
2170	45	2430,5	1	334	354,4	12,15
2170	44	2474,5	1	335	354,4	12,37
2170	45	2519,5	1	336	354,4	12,60
2170	46	2565,5	1	337	354,4	12,83
2170	45	2610,5	1	338	354,4	13,05
2170	45	2655,5	3	341	354,4	13,28
2190	43	2698,5	2	343	357,7	13,49
2210	41	2739,5	1	344	361,0	13,70
2210	45	2784,5	1	345	361,0	13,92
2210	43	2827,5	1	346	361,0	14,14
2210	44	2871,5	1	347	361,0	14,36
2210	45	2916,5	1	348	361,0	14,58
2220	43	2959,5	1	349	362,6	14,80
2230	43	3002,5	1	350	364,2	15,01
2230	42	3044,5	1	351	364,2	15,22
2230	39	3083,5	0,5	351,5	364,2	15,42
2235	45	3128,5	0,5	352	365,1	15,64
2235	45	3173,5	0,5	352,5	365,1	15,87
2235	47	3220,5	0,5	353	365,1	16,10
2235	45	3265,5	0,5	353,5	365,1	16,33
2235	44	3309,5	0,5	354	365,1	16,55
2235	45	3354,5	0,5	354,5	365,1	16,77
2235	40	3394,5	0,5	355	365,1	16,97
2235	44	3438,5	0,5	355,5	365,1	17,19
2240	44	3482,5	0,5	356	365,9	17,41
2240	43	3525,5	0,5	356,5	365,9	17,63
2250	46	3571,5	0,5	357	367,5	17,86
2250	50	3621,5	0,5	357,5	367,5	18,11
2250	70	3691,5	0,5	358	367,5	18,46
2250	46	3737,5	0,5	358,5	367,5	18,69
2250	46	3783,5	0,5	359	367,5	18,92
2250	43	3826,5	0,5	359,5	367,5	19,13
2250	44	3870,5	0,5	360	367,5	19,35
2250	46	3916,5	0,5	360,5	367,5	19,58
2250	46	3962,5	0,5	361	367,5	19,81
2250	45	4007,5	1	362	367,5	20,04
2250	45	4052,5	2	364	367,5	20,26
2250	47	4099,5	3	367	367,5	20,50

2250	46	4145,5	1	368	367,5	20,73
2250	46	4191,5	1	369	367,5	20,96
2250	45	4236,5	7	376	367,5	21,18
2250	46	4282,5	1	377	367,5	21,41
2250	49	4331,5	0,5	377,5	367,5	21,66
2250	45	4376,5	0,5	378	367,5	21,88
2250	46	4422,5	0,5	378,5	367,5	22,11
2250	50	4472,5	0,5	379	367,5	22,36
2250	46	4518,5	0,5	379,5	367,5	22,59
2250	44	4562,5	36	415,5	367,5	22,81
2250	45	4607,5	0,5	416	367,5	23,04
2250	45	4652,5	0,5	416,5	367,5	23,26
2250	45	4697,5	0,5	417	367,5	23,49
2250	45	4742,5	27	444	367,5	23,71
2250	55	4797,5	36	480	367,5	23,99
2250	55	4852,5	0,5	480,5	367,5	24,26
2260	50	4902,5	0,5	481	369,1	24,51
2260	48	4950,5	22	503	369,1	24,75
2260	52	5002,5	0,5	503,5	369,1	25,01
2260	55	5057,5	0,5	504	369,1	25,29
2260	50	5107,5	0,5	504,5	369,1	25,54
2260	80	5187,5	0,5	505	369,1	25,94
2260	53	5240,5	14	519	369,1	26,20
2260	52	5292,5	0,5	519,5	369,1	26,46
2260	50	5342,5	10	529,5	369,1	26,71
2260	50	5392,5	12	541,5	369,1	26,96
2260	50	5442,5	0,5	542	369,1	27,21
2260	50	5492,5	0	542	369,1	27,46

В представленной таблице общее время измерений с перестановкой тензомера определялось суммированием времени показателей предыдущего отчета со значениями времени измерений, взятыми из этой же таблицы. Значения степени относительной деформации определялись умножением показаний тензомера, при перестановке стрелки прибора, на цену его деления. В таблице цветом выделены моменты возникновения сигнала АЭ при нагружении образца.

Схема проведения эксперимента по регистрации моментов возникновения сигналов АЭ при нагружении образцов из стали СтЗсп с фиксацией относительного удлинения представлена на рис. 8.

Деформация материала при растяжении является процессом, кинетика которого на всех стадиях определяется движением дислокаций и их ансамблей.

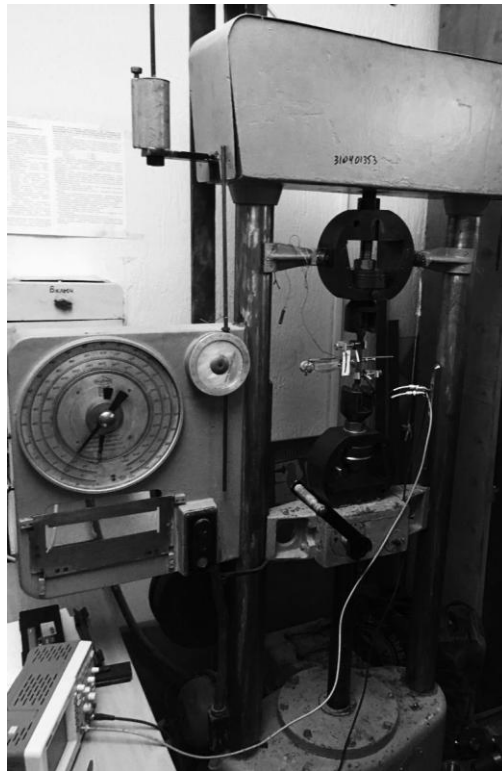


Рис. 8. – Внешний вид экспериментальной установки по обнаружению сигналов АЭ при изменении приложенной нагрузки с фиксацией относительного удлинения.

Результаты измерений зависимости степени относительной деформации образцов от приложенной нагрузки представлены на рис.9. Точками обозначены моменты возникновения сигналов АЭ, кружочками – границы силового поля, определенные из табл. 1, по результатам разрывных испытаний.

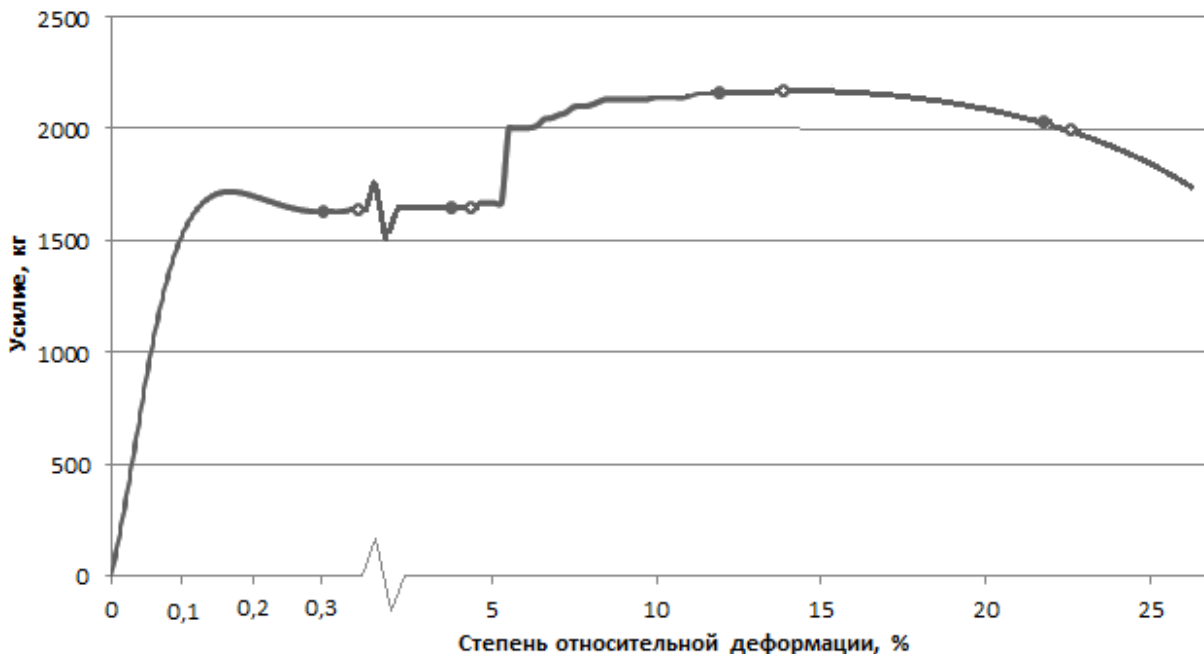


Рис. 9. – Диаграмма изменения степени деформации стали Ст3сп от приложенной нагрузки.

В результате эксперимента установлено скачкообразное возникновение сигналов АЭ при возрастании нагрузки. При нагружении образцов из стали Ст3сп четко прослеживаются три этапа (рис.9). Первый этап – этап макроупругой деформации, где соблюдается закон Гука. Вторым этапом – этап текучести, который соответствует деформации Чернова-Людерса и представляет собой упругое гомогенно-пластическое поведение. Третий этап – это этап деформационного упрочнения,

который предшествует разрушению. Отсутствие регистрации или низкий уровень активности АЭ свидетельствует не о полном отсутствии сигналов, а о низком уровне амплитуды и энергии излучаемых АЭ сигналов. При этом каждый параметр сигнала АЭ связан с каким-либо параметром процесса разрушения и является его акустическим отображением. Так в начальной стадии диаграммы нагружения справедлив закон Гука и напряжение в образце σ пропорционально деформации ε . Модуль упругости E определяется через тангенс угла наклона этой характеристики:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha .$$

Зона упругости ограничивается пределом пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$. После достижения $\sigma_{\text{пц}}$ деформации образца растут быстрее, чем приложенное напряжение и диаграмма становится криволинейной. При достижении пределов упругости остаточная деформация не наблюдается. Сигнал АЭ на этом участке обнаружен при усилии 1630 кг и относительной деформации 0,3 %. В то же время для разрывных испытаний граница силового поля упругой деформации наблюдается при нагрузке 1645 кг и деформации 0,9 %. Следовательно, фиксация зоны макроупругой деформации методами АЭ наступает раньше, чем это следует из разрывных испытаний.

На диаграмме нагружения рис.9 имеется горизонтальных участок, ограничивающий зону макроупругой деформации. На нем деформации растут без увеличения нагрузки. Этот участок табл. 1 соответствует усилию 1650 кг. Сигнал АЭ на этом же участке наблюдается при этой нагрузке при деформации 3,18 %. В то же время для разрывных испытаний граница силового поля при этой нагрузке наблюдается при деформации 3,79 %. Это значит, что фиксация деформационных переходов методами АЭ наступает раньше, чем это можно сделать из разрывных испытаний.

После площадки текучести с возрастанием нагрузки деформация начинает расти. Происходит самоупрочнение материала до достижения максимального значения напряжения на диаграмме рис. 9. Деформация становится равномерной. После этой точки деформация образца начинает концентрироваться в одном месте и образуется шейка, предшествующая разрыву. Сигнал АЭ на этом участке наблюдается при нагрузке 2170 кг и деформации 11,27 %, в то время как разрывные испытания фиксируют наступление границы силового поля при этой же нагрузке для деформации 13,28 %. Этот факт свидетельствует о том, что возникновение сигнала АЭ при деформационных изменениях структуры происходит раньше, чем это следует из разрывных испытаний.

Нисходящий участок диаграммы напряжения носит условный характер, поскольку площадь поперечного сечения образца непрерывно уменьшается после образования шейки. Разрушение образца произошло при напряжении $P_{\text{max}} = 375$ МПа. Это соответствует предельному напряжению для данной марки стали.

Дискретность разрушения подтверждается данными АЭ, полученными при различных степенях деформации: макроупругой деформации, текучести и деформационного упрочнения. Эксперимент показал, что фиксация предвестников возникновения изменения структуры с помощью АЭ измерений происходит значительно раньше, чем это обнаруживается механическими измерениями.

На рис.10 приведены характерные сигналы АЭ. В начале нагружения амплитуды сигналов были незначительны, однако с течением времени сигналы, сопровождающие процесс разрушения, нарастают и приобретают характер высокоамплитудных импульсов с соответствующим хрупким механизмом его развития в докритической стадии.

При практической реализации метода АЭ наиболее информативными являются амплитуда, амплитудное распределение и амплитудно-временное распределения.

При изменении условий деформирования и переходе на новую стадию деформирования при нагрузке изменяется тип концентраторов напряжения, порождающих дефекты. В процессе нагружения уравнивающая картина структуры материала изменяется и соответственно должна изменяться длина волны и период колебаний АЭ. Это подтверждается результатами экспериментов по снятию зависимости акустических сигналов от двух датчиков при нагрузках с усилием 1650 кг и 2170 кг или напряжениях 270 МПа и 355 МПа (рис. 10), что соответствует отмеченным этапам зависимости относительного удлинения, вызванного изменением приложенной нагрузки.

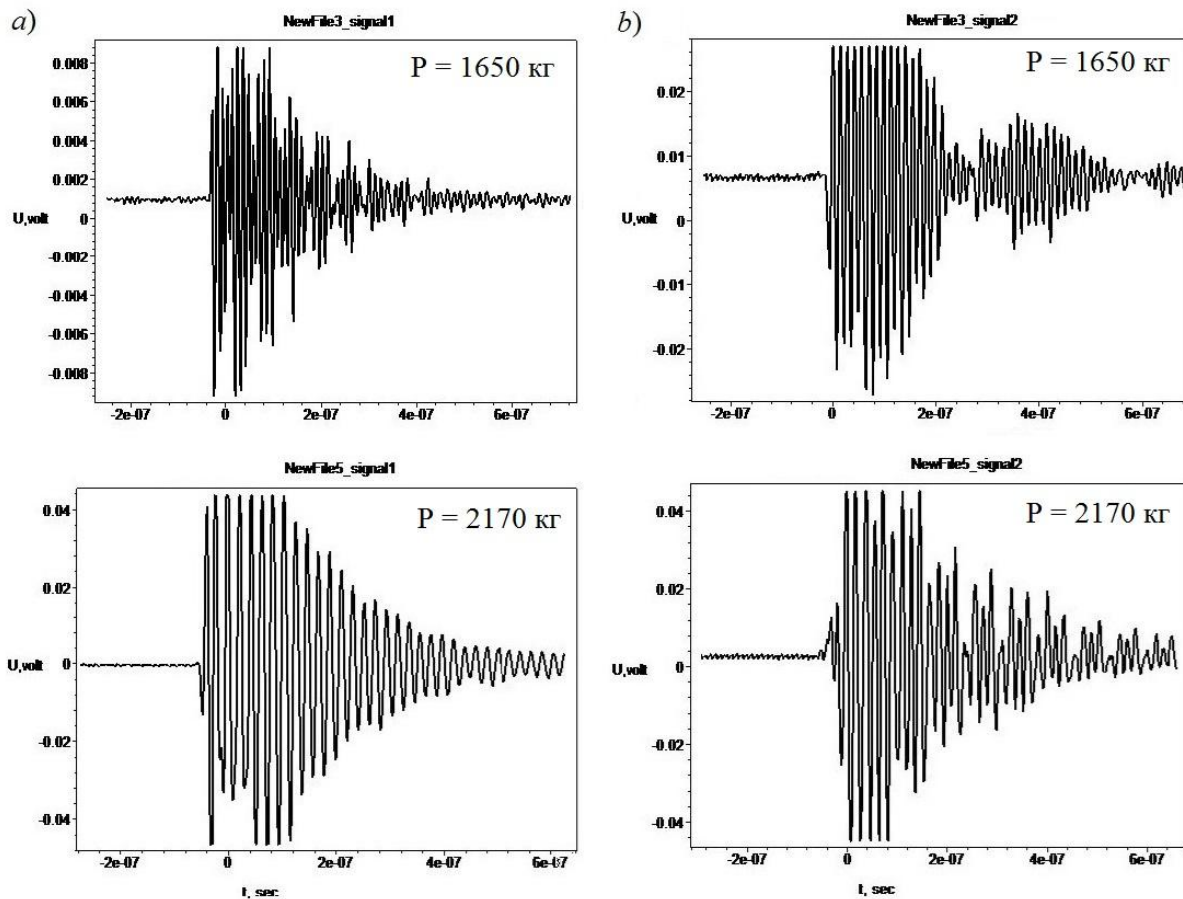


Рис. 10. – Сигналы АЭ от двух датчиков при разных нагрузках а) первый датчик б) второй.

Полученные сигналы характеризуются различным числом осцилляций, коррелирующих с изменениями в структуре материала, связанными с дискретным перемещением группы дислокаций.

Как следует из рассмотрения рис.10 плотность АЭ сигналов при возрастании нагрузки уменьшается. Экспериментально установлено [3,10], что чем реже акустический импульс, тем ниже частота АЭ сигнала. Следовательно, ответственной за изменение степени деформации стали СтЗсп при одноосном растяжении является низкочастотная часть акустического спектра. Объяснение этому явлению может быть выполнено с привлечением математических моделей трещинообразования, описанных в [7].

Поскольку квадрат амплитуды АЭ сигнала пропорционален его мощности, то с возрастанием его нагрузки и увеличением степени относительной деформации возрастает мощность АЭ сигнала, что на графиках рис.10 отмечено увеличением масштаба по оси ординат.

Результаты эксперимента позволяют вычислить энергию разрыва одной ячейки:

$$W = \frac{P_{\max}}{N},$$

где $P_{\max} = 2260$ кг – наблюдаемое в эксперименте максимальное усиление при разрыве.

N – общее количество ячеек в разрывном сечении образца.

Величина N определялась по формуле:

$$N = \frac{S}{a^2},$$

где S – площадь сечения в зоне разрыва
 a – расстояние между атомами в решетке.

Согласно [12] величина $a = 2,5 \cdot 10^{-10}$ м. Площадь сечения в зоне разрыва с учетом конфигурации разрушения, представленной на рис.1, равна 60 мм^2 . Тогда $N = 9,6 \cdot 10^{14}$ и $W = 2,35 \cdot 10^{-12}$ Дж. Это значение является количественным параметром чувствительности акустико-эмиссионной аппаратуры, предназначенной для фиксации начальной стадии разрушения материалов.

Возможным механизмом возникновения АЭ при изменениях структуры материала, вызванных деформацией, является отрыв дислокационных сегментов от точек закрепления. Акустическая эмиссия не является процессом, связанным с единичным элементарным атомом, а является коллективным процессом, в котором участвуют не менее 10^3 дислокаций.

Схема нагружения, в которой задается закон нагружения и фиксируются деформации как функция параметров силового воздействия, позволяет приблизить эксперимент к реальным условиям эксплуатации конструкций в широком интервале нагрузок [1,11].

Анализ моментов возникновения сигналов АЭ обнаруживает, что фиксация предвестников возникновения изменений структуры с помощью АЭ измерений, происходит значительно раньше, чем это обнаруживается в результате одноосных испытаний на растяжение при построении диаграммы изменения степени деформации от приложенной нагрузки. Обнаружить это явление обычными средствами механических измерений, даже в современном исполнении вследствие большой погрешности измерений достигнуть невозможно. Эта, экспериментально обнаруженная положительная особенность метода АЭ, должна получить свое дальнейшее техническое применение в перспективе его развития.

Выводы. Разработана методика исследований и конструкция образцов, позволяющие исследовать связь параметров нагружения и деформации с моментами возникновения сигналов АЭ. Обнаружена корреляция моментов возникновения сигналов АЭ при одноосном нагружении образцов из стали СтЗсп с деформационными переходами материала в функции от приложенного напряжения. Дискретность разрушения подтверждается данными АЭ, полученными при различных степенях деформации: макроупругой деформации, текучести и деформационного упрочнения.

Установлено, что в области упругой деформации первичная локализация источника АЭ начинается при усилиях больших 1630 кг и относительной деформации 0,3 %. В то же время при испытаниях на растяжение граница силового поля упругой деформации наблюдается при нагрузке 1645 кг и степени относительной деформации 0,9 %. Фиксация деформационных переходов в области пластического течения методами АЭ позволяет обнаружить предвестники изменения структуры материалов на более ранних стадиях.

Обнаружено, что в области текучести последующий источник АЭ наблюдается при нагрузке 1650 кг и степени деформации больше 3,2%. Здесь деформации растут без увеличения нагрузки. В то же время граница силового поля для этого участка нагружения при фиксированной нагрузке по данным испытаний на растяжение наблюдается при деформации 3,8 %. Следовательно, АЭ на площадке текучести является более информативным параметром структурных превращений материалов.

При переходе от пластической деформации к деформационному упрочнению АЭ сигналы наблюдаются при нагрузке 2170 кг и деформации 11,3 %, в то время как испытания на одноосные растяжения фиксируют наступление границы силового поля при этой же нагрузке для деформации 13,3 %.

Эксперимент показал, что фиксация возникновения изменений структуры с помощью АЭ измерений происходит значительно раньше, чем это обнаруживается механическими измерениями. Это может быть использовано при прогнозировании структурных изменений материалов при внешних возмущающих воздействиях.

Анализ амплитудного распределения АЭ сигналов во времени позволяет проследить развитие физических процессов. Регистрация АЭ в процессе деформации позволяет глубже понять механизмы ответственные за накопления повреждений. Возникновения сигналов АЭ при нагружении может служить информационным параметром при диагностировании развивающихся дефектов.

Литература

1. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашева Л.И., Кушнарева У.С., О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии // Техническая диагностика и неразрушающий контроль 2016 – №4 – С.9-13.
2. Carpinteri A. Structural damage diagnostic and lifetime assessment by acoustic emission monitoring / A. Carpinteri, G. Lacidogna, N. Pugno // Engineering Fracture Mechanics 2007 - №74 – P.273-289.
3. Болотин Ю.И. Акустическая эмиссия хрупких микроразрушений: монография / Ю.И. Болотин, Ю.Б. Дробот – Хабаровск 2003 – 154 с.

4. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Бадищук В.І. Дослідження впливу ультрафіолетового випромінювання та магнітної природи наповнювачів на властивості епоксинаповнених матеріалів // Вопросы химии и химической технологии. - 2004. -№3. -С.101-104.
5. Стухляк П.Д., Іванченко О.В., Букетов А.В., Долгов М.А. Теорія інформації (інформаційно-вимірвальні системи, похибки, ідентифікація): навчальний посібник. – Херсон: Айлант, 2011. – 371 с.
6. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Долгов М.А., Голотенко С.М. Модифіковані енергетичними полями епоксикомпозитні матеріали для захисних покриттів різного функціонального призначення // Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. - Тернопіль:ТДТУ, 13-14 травня.- 2009.- С.179.
7. Marasnov V., Sharko A. Mathematical Models of Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals // International Fronter Science Letters. Switzerland – 2016 – V.10 – P.37-44.
8. Шарко А.А. Информационные параметры сигналов акустической эмиссии при диагностировании развивающихся дефектов / А.А. Шарко // Матеріали Міжнародній наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCS 2017) – Херсон ХНТУ 2017– С.166-167.
9. Букетов А.В., Нигалатий В.Д., Рожков С.А., Шарко А.В. Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ 2015 – Вип. 48 – С.220-224.
10. Pollok A. Acoustic Emission Inspection / Metals Handbook. Ninth Edition ASM International – 1989 – Vol.17 – P.278-294.
11. Оглезнева Л.А. Акустические методы контроля и диагностики. Часть II / Л.А. Оглезнева, А.Н. Калиниченко – Томск. Изд-во Томского политехнического университета 2009 – 292с.
12. Башков О.В. Анализ эволюции дефектной структуры поликристаллических материалов на различных стадиях нагружения методом акустической эмиссии. /Автореф. дис. канд. техн. наук - Комсомольск на Амуре, 2012. - 20 с.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2017