

УДК 620.179.17

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Костюков Е.Н., Никифорова М.С., Никифоров И.И., Вахмистров С.А.,
Колмаков О.В.

ФГУП Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия

АННОТАЦИЯ

Определение возможности прогнозирования прочностных характеристик деталей из энергетических материалов по результатам контроля параметров акустической эмиссии при предварительном испытании деталей нагрузками, не превышающими предельного значения, является основной целью исследований, результаты которых рассматриваются в данной статье. Проведены экспериментальные работы по исследованию процесса разрушения и механических свойств деталей из пластифицированного октогена при испытании в условиях сжатия и растяжения с использованием метода акустической эмиссии. Проведен анализ диаграмм деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » и диаграмм параметров акустической эмиссии на предмет поиска «особых» точек на диаграммах акустической эмиссии, которые можно использовать в качестве основы при отработке метода прогнозирования. Выявлено, что наиболее информативными параметрами с точки зрения использования для прогнозирования предельных значений механических характеристик деталей является сумма импульсов и активность акустической эмиссии, значимые изменения которых наблюдаются в упругой области деформирования детали. Наличие на диаграмме активности акустической эмиссии «особой» точки в виде максимума позволяет вести визуальный контроль момента достижения критической нагрузки непосредственно в ходе эксперимента. Исследована возможность снижения нагрузки предварительного нагружения. На основе детального анализа диаграмм параметров акустической эмиссии и диаграмм деформирования и разбиения всего массива, полученных данных акустической эмиссии по частотам, было получено, что использование для расчета механических свойств деталей высокочастотных составляющих спектра выбросов акустической эмиссии дает возможность снизить нагрузку предварительного нагружения до уровня упругих деформаций, что позволит использовать испытанные детали для других видов исследований. Проведена серия контрольных опытов, результаты которых подтверждают возможность определения прочности деталей из пластифицированного октогена по результатам предварительного нагружения с погрешностью, сопоставимой с погрешностью определения прочности при механических испытаниях.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; пластифицированный октоген; растяжение; сжатие; физико-механические характеристики; предварительное нагружение; прогнозирование; частота выбросов в импульсе; «особая» точка

PREDICTION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF PARTS MADE OF ENERGY MATERIALS WITH USE OF ACOUSTIC EMISSION METHOD

Kostyukov E.N., Nikiforova M.S., Nikiforov I.I., Vakhmistrov S.A., Kolmakov O.V.

ABSTRACT

Capabilities assessment for predicting strength characteristics of energy materials specimens by the results of monitoring parameters of acoustic emission in the preliminary test of specimens by loads that don't exceed the limit value is the main purpose of the research, the results of which are discussed in this article. The experimental work has been fulfilled regarding the study of a fracture process and mechanical properties of specimens made of plasticized HMX during the trials under the conditions of compression and tension by using an acoustic emission method. The load-strain diagrams « $\sigma - \varepsilon$ » and the diagrams of acoustic emission parameters have been analyzed for a search of «exceptional» points in the acoustic emission diagrams, which can be used as a basis by developing a method of prediction. It has been revealed that the most informative parameters according to use for predicting of the mechanical characteristics limit of specimens are the number of acoustic emission events and the activity of acoustic emission, significant variation of which are observed in the elastic range of deformation of specimen. An «Exceptional» point in the form of a maximum of the activity of acoustic emission diagram allows to monitor the moment when the critical load is reached during the experiment visually. A possibility to reduce a load of the preloading has been studied. Based on a detailed analysis of the diagrams of acoustic emission parameters and load-strain diagrams and structuring by frequency of array data of acoustic emission it was been found that using of the high-frequency components of the acoustic emission for the mechanical properties of specimens analysis makes it possible to reduce the preload load to the level of compliance; it will allow to use tested specimens for other types of research. A set of check experiments was carried out, whose results provide support for a possibility to determine strength of parts made of plasticized HMX according to the results of preloading with an error comparable to a strength determination error under mechanical tests.

Keywords: acoustic emission; plasticized HMX; tension; compression; physical-mechanical characteristics; preloading; prediction; frequency of pulse spikes in a pulse; «exceptional» point

ВВЕДЕНИЕ

Метод акустической эмиссии (АЭ) широко применяется в различных областях промышленности для мониторинга объектов повышенной опасности. Цель этого мониторинга заключается в предотвращении аварийных ситуаций, связанных с разрушением материалов конструкций вследствие каких-либо внешних воздействий. Анализ сигналов АЭ позволяет определять как степень опасности возникающих повреждений конструкции, так и координаты участков с наибольшим уровнем поврежденности. Однако решение задач по контролю состояния реальных сложных масштабных промышленных объектов должно быть подкреплено результатами предварительного изучения закономерностей изменения сигналов АЭ в процессе накопления повреждений и разрушения материалов под нагрузкой, с отработкой методик измерения соответствующих характеристик в лабораторных условиях на модельных образцах при стандартных испытаниях.

Результаты, приведенные в данной статье, были получены при испытании деталей из энергетических материалов (ЭМ), которые также могут быть подвержены различным силовым воздействиям в процессе эксплуатации.

Некоторые данные об использовании АЭ при исследовании образцов из ЭМ на основе пластифицированного октогена приведены в работах [1,2]. В первой

из них представлены обобщенные результаты цикла исследований, демонстрирующие спектр возможных направлений использования АЭ при исследовании энергетических материалов. В работе [2] приведены результаты анализа параметров АЭ, записанных при кратковременных механических испытаниях образцов из ЭМ на сжатие и растяжение. При этом в качестве параметров АЭ использовали активность и суммарное количество импульсов. Сделан вывод о принципиальной возможности использования так называемых «особых» точек на диаграммах АЭ, записываемых в ходе нагружения, для контроля момента перехода разрушения в критическую стадию и расчета прочностных характеристик образцов по координатам этих точек на диаграммах. В качестве «особых» были обозначены точка максимальной активности АЭ и точка перегиба на диаграмме суммы импульсов. Показано, что эти точки проявляются при нагрузках, составляющих до 70 % от величины нагрузки, при которой образец разрушается. Тем не менее, полученные результаты, несмотря на небольшую статистику и значения нагрузок предварительного нагружения, достигающих 70% от предельной величины, позволили сделать предположение о возможности прогнозирования прочности деталей из ЭМ по результатам измерения параметров АЭ в диапазоне нагрузок, не приводящих к разрушению.

Основная цель исследований, результаты которых рассматриваются в данной статье, заключалась в поиске возможности снижения нагрузки предварительного нагружения. Одним из регистрируемых параметров АЭ является отношение «Выбросы/Длительность, кГц», или частота выбросов в импульсе. При проведении серии экспериментов было замечено, что использование для обработки результатов измерения сигналов АЭ верхнего диапазона частоты выбросов (вышеуказанного отношения «Выбросы/Длительность, кГц») приводит к уменьшению времени проявления максимума событий на этой частоте, что соответствует меньшей величине нагрузки. Для подтверждения возможности использования параметра «Выбросы/Длительность, кГц» в целях решения задачи снижения нагрузки предварительного нагружения был проведен цикл экспериментов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Как и в работе [2] запись сигналов АЭ проводили с использованием системы акустико-эмиссионного контроля ALine-32D, производства фирмы «Интерюнис», г. Москва, при следующих исходных установках аппаратуры:

- максимальная длительность события – 65535 мкс;
- SCETO – 500 мкс;
- «мертвое» время – 32 мкс;
- порог по амплитуде – 34,97 дБ.

Диаграммы АЭ записывали при испытании деталей на растяжение и сжатие. Испытанию на растяжение подвергались призматические детали размером 10x15x150 мм, при сжатии использовали детали цилиндрической формы Ø 20 мм и высотой 30 мм, изготовленные из пластифицированного октогена. В связи с небольшим размером испытываемых деталей и длительностью эксперимента, не превышающей полутора-двух минут, для записи сигналов АЭ был использован один канал и минимальное время усреднения, предусмотренное в используемой системе контроля, равное одной секунде.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Полученные после испытаний деталей массивы параметров АЭ, отражающие их изменения в процессе нагружения, были проанализированы на предмет их разделения по частотным диапазонам выбросов.

На рис.1,2 представлены диаграммы частоты выбросов, полученные в результате постобработки параметров АЭ, записанных в процессе нагружения деталей в условиях растяжения и сжатия.

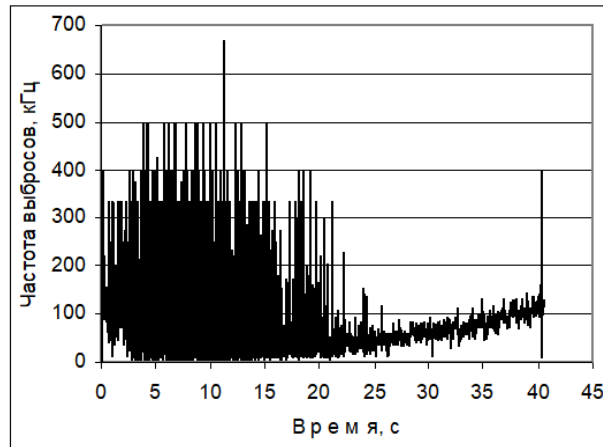


Рис.1. Зависимость частоты выбросов («Выбросы/Длительность», кГц) от времени нагружения при испытании деталей на растяжение.

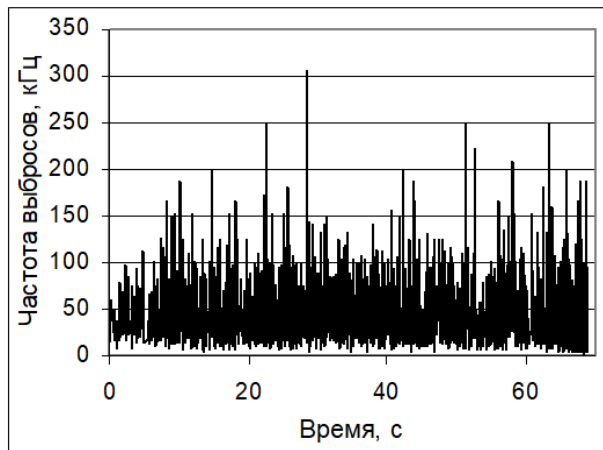


Рис.2. Зависимость частоты выбросов («Выбросы/Длительность», кГц) от времени нагружения при испытании деталей на сжатие.

Из рис.1 и 2 видно, что частотный диапазон выбросов изменяется от ~10 до 500 кГц. Диаграмма на рис.1 свидетельствует о том, что по мере увеличения времени нагружения (роста нагрузки) высокочастотная составляющая сигнала АЭ практически сходит на «нет» и перед разрушением на диаграмме явно выделяется часть сигналов с низкими частотами выбросов в диапазоне до 100-125 кГц. Известно [3-5], что разрушение является стадийным процессом. Смена стадий обусловлена накоплением критической концентрации дефектов определенного уровня. Уровень или масштаб возникающих дефектов может характеризоваться, в том числе, и частотой сигналов АЭ. В представленном случае, например,

достаточно резкий переход от высокочастотной составляющей сигнала к низкочастотной, наблюдаемый на рис.1, может свидетельствовать о сокращении времени межстадийного перехода и высокой скорости локализации дефектов.

При сжатии, рис.2, картина изменения частоты выбросов в процессе нагружения деталей несколько иная: основное отличие от растяжения – отсутствие явно выраженного участка диаграммы с низкой частотой выбросов. Это различие диаграмм, вероятно, обусловлено различием напряженного состояния, создаваемого в деталях при растяжении и сжатии.

Тем не менее, с учетом результатов контроля частоты выбросов при испытании деталей на растяжение, можно предположить, что каждая часть частотного спектра выбросов сигналов АЭ соответствует возникновению дефектов определенного уровня. В этом случае превалирование низкочастотной составляющей импульсов на конечном участке приведенных диаграмм означает достижение критической концентрации дефектов, размер которых достаточен для того, что их развитие может при достижении определенной концентрации вызвать спонтанное разрушение детали. Это предположение является основой для выбора направления исследований, цель которых заключалась в оценке возможности снижения величины нагрузки предварительного нагружения за счет выделения высокочастотной составляющей выбросов сигнала АЭ.

Проведены испытания группы деталей и анализ полученных при испытаниях диаграмм параметров АЭ с разделением сигналов по частоте выбросов. В качестве основных рассматривались два частотных диапазона: до 125 кГц (низкочастотный) и выше 125 кГц (высокочастотный). Все представленные ниже диаграммы являются результатом усреднения экспериментальных данных, полученных с десяти образцов.

На рис.3 представлены диаграммы активности АЭ, полученные при испытании деталей на растяжение. Диаграммы построены для двух выше указанных частотных диапазонов. С помощью аппроксимации диаграмм полиномами и их последующего анализа определены координаты точек максимума активности АЭ. На диаграмме активности, построенной для частотного диапазона до 125 кГц, эта точка имеет координаты: (0,083%; 5,4 МПа), для частотного диапазона выше 125 кГц – (0,067%; 4,6 МПа). Видно, что с повышением частот выбросов АЭ точка экстремума активности смещается в сторону снижения нагрузки и деформации.

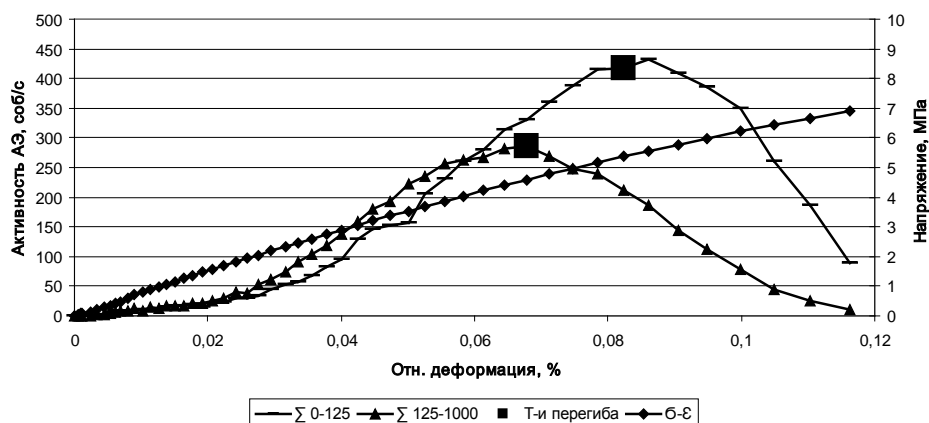


Рис.3. Диаграммы деформирования и активности АЭ для двух частотных диапазонов, полученные при испытании деталей 10x15x150 мм в условиях растяжения.

Средние значения разрушающих напряжения и деформации для исследуемых образцов равны: $\sigma_p = 6,9$ МПа, $\varepsilon_p = 0,12\%$.

Расчетным путем показано, что координата точки максимума активности АЭ по оси времени соответствует:

- для диапазона частот 0-125 кГц – 66% от величины деформации разрушения (ε_p) и 72% от значения разрушающей нагрузки (P_p);
- для диапазона частот 125-1000 кГц – 55% от величины деформации разрушения (ε_p) и 62% от значения разрушающей нагрузки (P_p).

На рис.4 представлены диаграммы активности АЭ, полученные при испытании деталей на сжатие. Из рис.4 видно, как и при растяжении, точка максимума диаграммы активности АЭ высокочастотного диапазона смещается в сторону снижения нагрузки и деформации.

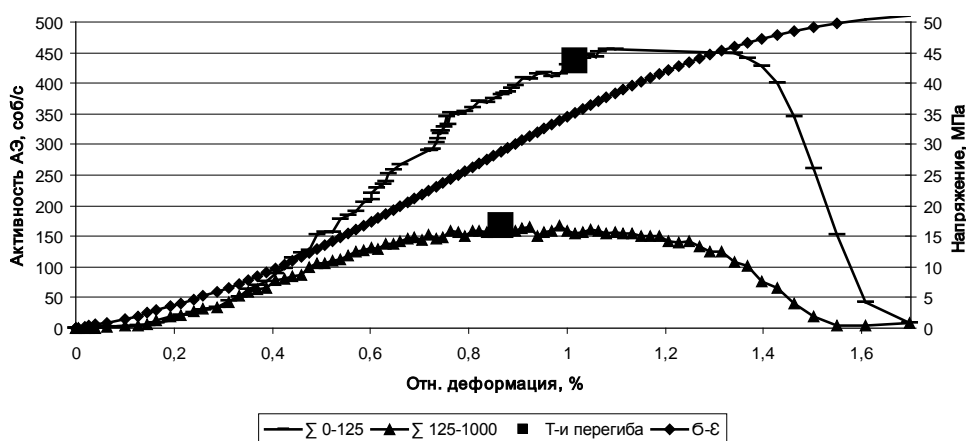


Рис.4. Диаграммы деформирования и активности АЭ для двух частотных диапазонов, полученные при испытании деталей Ø20x30 мм в условиях сжатия.

Средние значения разрушающих напряжения и деформации для этих образцов составили: $\sigma_p = 51$ МПа, $\varepsilon_p = 1,70\%$.

Расчетным путем показано, что координата точки максимума активности АЭ соответствует:

- для диапазона частот 0-125 кГц (1,01%; 35 МПа) – 59% от величины деформации разрушения (ε_p) и 67% от значения разрушающей нагрузки (P_p);
- для диапазона частот 125-1000 кГц (0,86%; 29 МПа) – 51% от величины деформации разрушения (ε_p) и 57% от значения разрушающей нагрузки (P_p).

Таким образом, полученные результаты подтвердили предварительный вывод поисковых экспериментов о том, что выделение высокочастотной составляющей спектра выбросов дает возможность снизить нагрузку предварительного нагружения. Для экспериментальной проверки полученных соотношений между $P_{\text{макс}}$ и P_p и определения значений прочности по результатам предварительного нагружения были проведены испытания группы образцов, не использовавшихся при их расчете.

Способ прогнозирования состоял в следующем: деталь нагружали до момента, когда активность АЭ достигала своего максимального значения,

после чего нагружение останавливали и определяли значения ε_i , соответствующие максимуму активности.

Используя значения P_i и ε_i , соответствующие \dot{N}_{\max} , по нижеприведенным соотношениям определяли предельные характеристики детали из ВВ:

при сжатии детали

$$\varepsilon_p = \frac{100\%}{51\%} * \varepsilon_i, \%$$

$$P_p = \frac{100\%}{57\%} * P_i, \text{ кН}$$

$$\sigma_p = \frac{100\%}{57\%} * \sigma_i, \text{ МПа}$$

при растяжении детали

$$\varepsilon_p = \frac{100\%}{55\%} * \varepsilon_i, \%$$

$$P_p = \frac{100\%}{62\%} * P_i, \text{ кН}$$

$$\sigma_p = \frac{100\%}{62\%} * \sigma_i, \text{ МПа}$$

Далее деталь доводили до разрушения, и определяли предельные значения механических характеристик. В Таблице 1 приведены их расчетные и экспериментальные значения.

Таблица 1.

Расчетные и экспериментальные значения механических характеристик деталей.

№№ деталей	$\varepsilon, \%$			P, кН			$\sigma, \text{ МПа}$		
	$\varepsilon_{\text{расч.}}$	$\varepsilon_{\text{экс.}}$	Δ	$P_{\text{расч.}}$	$P_{\text{экс.}}$	Δ	$\sigma_{\text{расч.}}$	$\sigma_{\text{экс.}}$	Δ
при растяжении деталей									
1	0,10	0,11	-0,01	1,11	1,10	0,01	6,81	6,77	0,04
2	0,13	0,12	0,01	1,11	1,05	0,06	6,99	7,88	-0,89
3	0,13	0,12	0,01	1,22	1,14	0,08	7,54	7,06	0,48
4	0,12	0,13	-0,01	1,23	1,16	0,07	7,60	7,20	0,4
5	0,10	0,10	0,00	1,00	0,97	0,03	6,40	6,13	0,27
6	0,08	0,09	-0,01	0,96	1,09	-0,13	6,00	6,84	-0,84
7	0,12	0,12	0,00	1,19	1,13	0,06	7,45	7,07	0,38
8	0,07	0,07	0,00	1,06	1,07	-0,01	6,65	6,7	-0,05
9	0,10	0,11	-0,01	1,19	1,18	0,01	7,40	7,35	0,05
10	0,12	0,11	0,01	1,17	1,12	0,05	7,23	6,94	0,29
при сжатии деталей									
1	1,58	1,64	-0,06	13,92	15,49	-1,57	44,06	49,03	-4,97
2	1,66	1,45	0,21	16,03	14,69	1,34	50,88	46,64	4,24
3	1,50	1,48	0,02	14,52	15,02	-0,50	46,10	47,68	-1,58
4	1,63	1,76	-0,13	16,82	16,99	-0,17	53,40	53,94	-0,54
5	1,46	1,51	-0,05	15,78	16,27	-0,49	50,10	51,65	-1,55
6	1,40	1,77	-0,37	15,00	18,42	-3,42	47,61	58,46	-10,35
7	1,61	1,60	0,01	19,02	18,10	0,92	60,38	57,47	2,91
8	2,11	2,04	0,07	16,23	15,96	0,27	51,68	50,84	0,84
9	1,66	1,79	-0,13	16,38	17,03	-0,65	52,16	54,22	-2,06
10	1,57	1,64	-0,07	13,96	15,49	-1,53	44,18	49,03	-4,85

где: ε – относительная деформация, %; P – разрушающая нагрузка, кН; σ – предел прочности, МПа; $\Delta = (x_{\text{расч}} - x_{\text{экс}})$ – разница между расчетной величиной и экспериментальной.

По данным Таблицы 1 с использованием формулы для определения среднеквадратичного отклонения «s»

$$s = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{9}},$$

получили, что величина СКО для значений каждого из трех рассчитываемых параметров не превышает 10%, что сопоставимо с разбросом экспериментальных данных, получаемых при стандартных механических испытаниях.

ВЫВОДЫ

На примере исследований акустической эмиссии при испытании образцов из энергетических материалов на основе пластифицированного октогена на кратковременное растяжение и сжатие показано:

- использование для расчета механических свойств деталей высокочастотных сигналов АЭ дает возможность снизить нагрузку предварительного нагружения до уровня упругих деформаций;
- уровень значений механических характеристик, соответствующий точке максимума активности АЭ не превышает 0,50 от σ_p и 0,56 от P_p при испытании деталей в условиях сжатия и 0,55 от σ_p и 0,60 от P_p при испытании деталей в условиях растяжения;
- установленные значения нагрузок предварительного нагружения значительно ниже критического уровня напряжений в деталях, что позволяет использовать испытанные детали для других видов исследований;
- наличие на диаграмме активности АЭ «особой» точки в виде максимума позволяет вести визуальный контроль момента достижения критической нагрузки в ходе эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костюков Е.Н., Власов Ю.А., Фомичева Л.В. *Исследование процесса разрушения изделий из взрывчатых веществ с помощью акустической эмиссии* // Механика композитных материалов. – 1996. – Т.32. – №6. – С.818-823.
2. Костюков Е.Н., Вахмистров С.А., Игошина С.Г., Колмаков О.В. *Акустическая эмиссия при механических испытаниях образцов из пластифицированного октогена* // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т.16. – №5. – С.111-114.
3. Огородников В.А., Пушков В.А., Тюпанова О.А. *Основы физики прочности и механика разрушения: Учебное издание. 2-е изд., испр. и доп.* – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. – 387с.: ил.
4. Конева Н.А., Козлов Э.В. *Физическая природа стадийности пластической деформации* // Известия Вузов. Физика. – 1990. – Т.33. – №2. – С.89-106.
5. Буйло С.И. *Диагностика стадий деформации и разрушения по интегральным параметрам потока актов акустической эмиссии* // Дефектоскопия. – 2004. – №8. – С.66-78.

REFERENCES

1. Kostyukov E.N., Vlasov Ya.A., Fomicheva L.V. *Issledovanie protsessa razrusheniya izdelij iz vzryvchatykh veshhestv s pomoshh'yu akusticheskoy ehmissii*

- [The study of the fracture process of HE products by the help of acoustic emission].* Mekhanika kompozitnykh materialov, 1996, Vol.32, No.6, Pp.818-823.
2. Kostyukov E., Vakhmistrov S.A., Igoshina S.G., Kolmakov O.V. *Akusticheskaya ehmissiya pri mekhanicheskikh ispytaniyakh obraztsov iz plastifitsirovannogo oktogena [Acoustic emission at mechanical tests of samples made of plasticized HMX].* Fizicheskaya mezomekhanika, 2013, Vol.16, No.5, Pp.111-114.
 3. Ogorodnikov V.A., Pushkov V.A., Tyupanova O.A. *Osnovy fiziki prochnosti i mekhanika razrusheniya: Uchebnoe izdanie. 2-e izd., ispr. i dop. [Basis of physics of strength and fracture mechanics. The second Iss., corrected and supplemented].* Sarov, RFYATS-VNIIHF, 2009, 387 p.: ill.
 4. Koneva N.A., Kozlov E.V. *Fizicheskaya priroda stadiynosti plasticheskoy deformatsii [Physical nature of phasic plastic deformation].* Izvestiya Vuzov, Fizika, 1990, Vol.33, No.2, Pp.89-106.
 5. Buylo S.I. *Diagnostika stadij deformatsii i razrusheniya po integral'nyim parametram potoka aktov akusticheskoy ehmissii [Diagnostics of stages of deformation and fracture according to integral parameters of a flow of acts of acoustic emission].* Defektoskopiya, 2004, No.8, Pp.66-78.

Поступила в редакцию 26 сентября 2018 года.

Сведения об авторах:

Костюков Евгений Николаевич – к.т.н., нач. лаб., ФГУП Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия; e-mail: e.kostyukov@list.ru

Никифорова Маргарита Сергеевна – м.н.с., ФГУП Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия; e-mail: bakssarov@mail.ru

Никифоров Игорь Игоревич – инж. 1 кат., ФГУП Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия; e-mail: nigori@yandex.ru

Вахмистров Сергей Анатольевич – к.т.н., нач.отд., ФГУП Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия

Колмаков Олег Викторович – с.н.с., ФГУП Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия; e-mail: veters@inbox.ru