

УДК 620.172.24:534.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭМИССИИ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА

*Савельев А.Н., к.т.н., доцент кафедры «Механика и машиностроение» (savelyev2000@mail.ru)*

*Савельева Е.А., соискатель степени к.т.н. кафедры «Механика и машиностроение»*

*Анисимов Д.О., аспирант кафедры «Механика и машиностроение»*

*Прохоренко О.Д., к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Теплоэнергетика и экология» (kafedra-TEE@yandex.ru)*

**Сибирский государственный индустриальный университет**  
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Рассмотрены результаты оценки экспериментального определения усталостных характеристик материала испытываемых образцов на основе эмиссии волн напряжений. Опираясь на ранее опубликованные авторами материалы по использованию синергетически организованной акустической эмиссии, подготовлен и выполнен эксперимент. В опытах на разных материалах продемонстрирована возможность использования сигнала акустической эмиссии для оперативного определения механических характеристик и прежде всего предела выносливости. Образцы для испытания материалов на усталостную прочность изготавливали из пяти марок сталей и одной марки бронзы Бр АЖ9-4. На каждом из материалов было проведено по пять опытов. Образцы в эксперименте подвергались мелкоступенчатому нагружению, на каждом шаге которого одновременно происходило излучение эмиссионного сигнала, и подготавливалась очередная серия дислокаций, способных в следующий момент нагружения выйти на поверхность кристалла и излучить волну напряжений. Таким образом формировалось совместное излучение энергетически подготовленных к движению дислокаций, обеспечивающее достаточно мощный для устойчивой регистрации сигнал. Сопоставление экспериментальных данных, полученных на основе сигнала синергетически организованной акустической эмиссии, с расчетными значениями предела выносливости, полученными по известным эмпирическим формулам через предел прочности данного материала, оцененное по критерию Фишера, показало их адекватность при пятипроцентном уровне значимости. Оценка экспериментальных результатов определения предела выносливости на основе сигнала акустической эмиссии по критерию Кохрена свидетельствует о том, что дисперсии результатов замеров в эксперименте у всех видов используемых материалов однородны. Результаты работы показали, что метод определения предела выносливости материала на основе синергетически организованной акустической эмиссии позволяет оперативно получать экспериментальные значения предела выносливости материала с достаточно высокой степенью точности.

**Ключевые слова:** эмиссия волн напряжений, синергетически организованный сигнал акустической эмиссии, мелкоступенчатое нагружение, предел выносливости материала.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-141-147

### **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие тяжелого машиностроения характеризуется постоянным стремлением к повышению надежности и качества выпускаемой продукции. Одно из направлений повышения прочностных характеристик машиностроительных изделий связано с контролем механических свойств материалов, из которых они изготавливаются. Особо важным показателем материалов, характеризующим их прочность, является их предел выносливости. Его используют в большинстве расчетов элементов технологических машин металлургической промышленности, он является определяющим при оценке характеристик надежности материалов [1 – 5]. Одним из способов инструментального контроля предела выносливости в процессе изготовления машиностроительных изделий является метод определения усталостных характеристик с помощью синергетически организованной эмиссии волн напряжений [6]. Этот ме-

тод позволяет определить характер процессов, происходящих в материале в течение единичной его деформации растяжения, включая и определение значения предела выносливости. Информация о протекающих в металле внутренних изменениях обеспечивается посредством эмиссии волн напряжений, которая является прямым откликом на процессы, происходящие в структуре материала, и отражает все протекающие в нем изменения.

В настоящей работе экспериментальным способом показана возможность использования метода, основанного на синергетически организованных сигналах акустической эмиссии для нахождения усталостных характеристик материалов элементов технологических машин.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

Усталостное разрушение материала машин происходит в результате продолжительного по времени пре-

образования структур материала, накопления повреждений, зарождения и развития несплошностей типа микротрещин, которые в дальнейшем объединяются в трещины. Как отмечено в работах [6 – 8], из протекающих на структурном уровне при единичном нагружении процессов уже ясно, при каком напряжении в материале наступают изменения, соответствующие пределу выносливости. Поэтому для выделения точек изменения преобладающего механизма накопления повреждений при циклическом нагружении требуется всего один этап нагружения образца (статический). Это подтверждает то, что деформируемое твердое тело является самоорганизующейся системой. Во время деформации самоорганизующейся системы происходит организация той или иной из диссипативных дислокационных субструктур, сопровождающаяся произвольной перестройкой их вблизи точек бифуркации [9]. Параметр, который характеризует процесс изменения субструктур, является скалярная плотность дислокаций или плотность энергии упругой деформации материала. При циклическом нагружении обе эти характеристики определяют скорость формирования повреждений. Движение же дислокаций в материале начинается уже при первом нагружении материала, что дает возможность при непосредственной регистрации деформационных процессов в структуре материала выявить в течение единичного нагружения величину напряжения, соответствующую пределу выносливости.

По мере накопления в материале деформаций можно выделить пороговые значения плотности дислокаций ( $\rho$ ), которые определяют изменение механизма формирования дислокационных структур [9 – 11]. Отмечено, что в металлах при растяжении наименее плотная структура дислокаций – хаотическая, за ней следует клубковая. Переход от клубковой структуры к ячеистой происходит при  $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , от ячеистой к полосовой – при  $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и от полосовой к фрагментированной – при  $\rho = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Следовательно, сформированный в большей степени тип структуры будет являться предвестником перехода к новому (лидирующему) типу формирования в материале дефектов. При этом спонтанная перестройка дислокационной субструктуры предполагает спонтанную смену лидирующего механизма, ответственного за диссипацию энергии деформации и, соответственно, смену величины эмиссионного сигнала. А так как появление в системе иерархической последовательности дислокационных структур все новых и новых субструктур дислокаций, необходимых для организации диссипации упругой энергии в материале, является фундаментальным диссипативным механизмом упруго-пластичных материалов, то и изменение акустического сигнала, сопровождающего деформационные процессы в материале, также является закономерным. При этом диссипативные механизмы, контролирующие переход структуры из одного устойчивого состояния в другое, а также иерархическая смена диссипативных

структур инвариантны к внешним условиям нагружения [9]. Это представление о поведении структуры металлов во время их нагружения позволило в работе [12] сформировать новый подход к выявлению особенностей протекающих в структуре материала процессов.

Данный подход опирается на то, что одним из основных механизмов необратимого структурного изменения металлов и сплавов является движение и локализация в них дислокаций и формирование, таким образом, усталостных трещин [9, 12]. При этом наличие локальных полей напряжений вокруг дислокаций при достаточно высокой скорости их движения создает необходимые условия для возникновения акустической эмиссии [13 – 18]. Информация, которую этот сигнал несет напрямую из точки локального повреждения материала, позволяет судить о величине и моменте возникновения того или иного вида повреждений, включая повреждение, возникающие при достижении нагрузки на материал, соответствующей его пределу выносливости. Одновременно данный подход учитывает тот факт, что амплитуда механических колебаний каждого из акустических сигналов, приходящих на поверхность образца, очень мала, а интенсивность сигналов «размазана» во времени и составляет от нуля до 105 импульсов в секунду [15]. Это создает определенные трудности для регистрации таких сигналов.

Для усиления сигнала акустической эмиссии использовали метод синергетической организации сигнала эмиссии волн напряжений [6, 12]. В этом случае сконцентрированный в достаточно малом временном периоде  $\Delta t$  акустический сигнал от ряда дислокаций становится достаточно мощным для его устойчивого восприятия приборами. Для такой организации сигнала используется уже известный на сегодняшний день в физике коллективный или синергетический эффект [19, 20]. При использовании подобного механизма усиления сигнала акустической эмиссии в металлах нагружение образца производится мелкоступенчатым образом. Носителем энергии в синергетическом подходе в такой ситуации выступают дислокационные структуры [21, 22]. При каждом нагружении образца на величину  $\Delta\sigma$  ступенчато повышается потенциальная энергия среды, в которой существуют дислокации, и ступенчато увеличивается энергетическое состояние дислокаций. При этом у той группы дислокаций, энергетическое состояние которой достигло максимума при предшествующем нагружении, происходит коллективное выделение эмиссионного сигнала, а у следующей группы дислокаций потенциальная энергия возрастает до максимума.

Таким образом, при мелкоступенчатом растяжении образца, при каждом импульсном приросте напряжения активируется до максимального уровня очередная серия дислокаций. Одновременно дислокации, которые были активированы во время предыдущего шага нагружения и которые находились к этому моменту в возбужденном

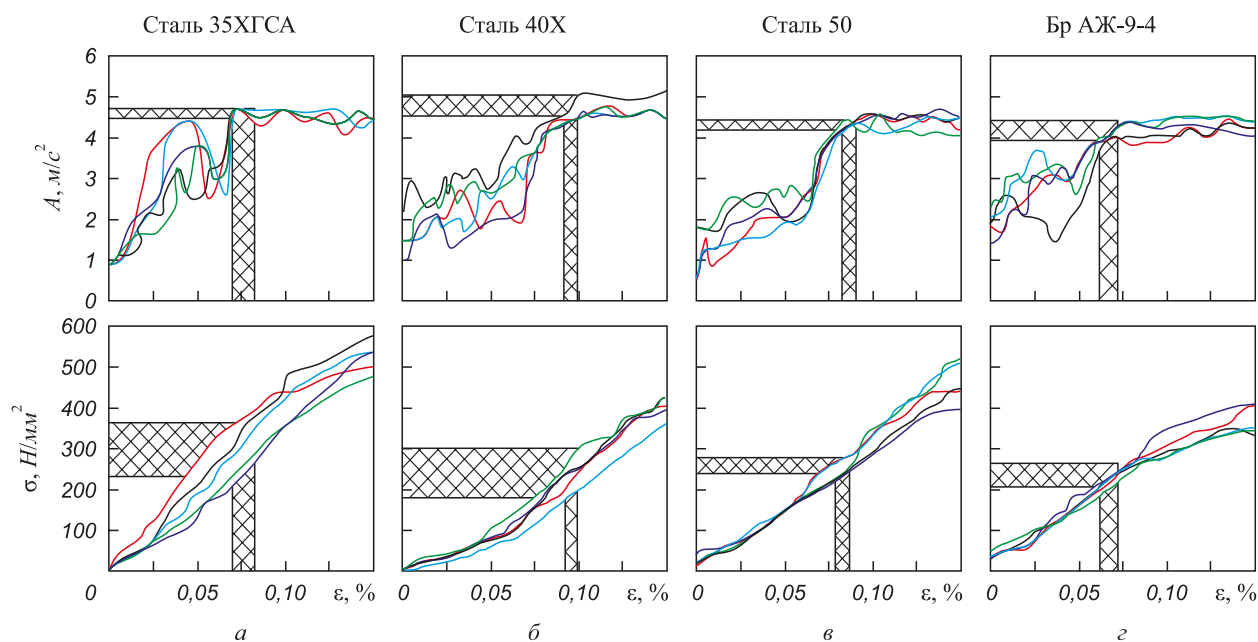
состоянии, совершают коллективное движение с коллективной эмиссией волн напряжений. В результате внутренние процессы в металле, соответствующие данному уровню напряжений, фиксируются при помощи регистрации амплитуды колебаний волн напряжений эмиссионного сигнала [6, 12].

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Данный подход к организации мощного эмиссионного сигнала в металлических образцах был использован для оценки характера изменения эмиссионных сигналов у ряда материалов в процессе их мелкоступенчатого нагружения. В качестве объектов исследования были выбраны образцы из следующих материалов: стали 45, стали 35ХГСА, стали Х17, стали 20, стали ст. 6, стали 40Х, стали 50, бронзы Бр АЖ-9-4. Каждый комплект состоял из пяти образцов, изготовленных из одной партии материала. Используемые в опытах образцы диаметром 15 мм и длиной цилиндрической части 90 мм растягивались на специально модернизированной испытательной машине УММ-20. Средняя скорость растяжения образцов соответствовала 2,5 мм/с. Подробное описание установки приведено в работе [6] на рис. 2. В процессе проведения опытов образцы подвергались мелкоступенчатому растяжению, в результате которого при каждом импульсном приросте напряжения внутренние процессы, соответствующие напряжению и активированные данным скачком напряжения в материале, фиксировались при помощи регистрации энергии волн напряжений. Величина сигнала характе-

ризовала энергию каждого из суммарных импульсов эмиссии волн напряжений и оценивалась через интенсивность нарастания энергии этой волны. Результаты обработки эмиссионных сигналов для сталей марок 35ХГСА, 40Х и 50, а также бронзы Бр АЖ-9-4 показаны на рисунке.

Из приведенного рисунка следует, что при достижении определенного момента в процессе растяжения образцов энергия эмиссионного сигнала начинает возрастать. Интенсивность нарастания сигнала эмиссии волн напряжений в процессе нагружения образцов неоднородна. Появление точек изменения интенсивности эмиссии волн напряжений и, соответственно, участков между ними связано с изменением процессов, протекающих в дислокационной структуре металлов. При этом на кривой изменения энергии сигнала ЭВН можно отчетливо выделить точку перехода от участка крутого возрастания сигнала к участку его неизменной величины. Полученный в работе [6] результат позволяет предположить, что напряжение предела выносливости соответствует моменту деформации материала, при котором клубковая структура занимает весь его объем, а эмиссия волн напряжений переходит от этапа возрастания ее значения к этапу стабилизации этого значения. Таким образом, если нагрузка возрастает до предела выносливости, в зернах материала, начинается стабильное накопление поверхностных полос скольжения и в конечном итоге зарождение субмикротрещин [23 – 26]. При образовании каждой из полос скольжения выделяется однозначное по величине количество энергии, а соответственно формируется однородный по амплитуде



Характер изменения акустического сигнала при микроступенчатом растяжении образцов из стали марок 35ХГСА (а), 40Х (б), 50 (в) и бронзы марки БрАЖ-9-4 (г)

Nature of changes in the acoustic signal in case of microstage stretching of the samples of 35KhGSA (a), 40Kh (б), 50 (в) steels and of BrAZh-9-4 bronze (г)

сигнал ЭВН. В связи с этим за величину  $\sigma_{-1}$  принимается напряжение, соответствующее моменту перехода наклонного участка кривой, огибающей амплитуду сигналов ЭВН, в горизонтальный.

Оценка предела выносливости, полученного на основе эмиссии волн напряжений в испытуемом образце, выполнялась путем сравнения статистических показате-

телей этой величины с данными, взятыми из литературных источников [27, 28]. Для этого были зафиксированы значения пределов прочности испытуемых материалов и по приведенным в литературе зависимостям определены пределы выносливости исследуемых в работе материалов. Результаты сравнения экспериментальных данных с литературными приведены в таблице. Одно-

**Сравнение экспериментальных и теоретических данных**

**Comparison of experimental and theoretical data**

Материал	Экспериментальное значение $\sigma_{-1}$ , Н/мм <sup>2</sup>					Экспериментальное значение $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>				Расчетное значение $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>			Оценка адекватности значений и $\sigma_{-1(расч.)}$		
	Номер опыта	$\sigma_{-1}^{оп}$	$\sigma_{-1(ср)}$	$\sigma_{(\sigma_{-1})}^2$	KK	$\sigma_B$	$\sigma_{B(ср)}$	$\sigma_B^2$	KK	Расчетная формула	$\sigma_{-1(расч.)}$	$\sigma_{-1(ср)}^2$	$\sigma_{ад}^2$	$\sigma_{экс}^2$	KF
Сталь 40X	141	270	251,0	505,0	0,227	710	785,4	2520,8	0,237	$\sigma_{1(расч.)} = 0,35\sigma_B + 5,3$	253,8	280,19	601,51	450,03	1,37
	149	240				785					280,05				
	145	250				800					285,3				
	143	275				850					302,8				
	146	220				782					279,0				
Сталь 35ХГСА	206	234	276,8	741,2	0,227	645	696,2	2927,7	0,237	$\sigma_{1(расч.)} = 0,35\sigma_B + 5,3$	231,05	248,97	601,51	450,03	1,37
	205	360				635					227,55				
	204	280				708					253,1				
	207	300				755					269,55				
	208	270				738					263,6				
Сталь Ст. 6	105	260	253,0	195,0	0,227	765	744,0	417,5	0,237	$\sigma_{1(расч.)} = 0,35\sigma_B + 12,2$	279,95	272,6	601,51	450,03	1,37
	106	230				730					267,7				
	107	260				765					279,95				
	108	265				740					271,2				
	109	250				720					264,2				
Сталь 50	15	270	240,0	800,0	0,227	720	714,4	926,8	0,237	$\sigma_{1(расч.)} = 0,35\sigma_B + 12,2$	264,2	262,4	601,51	450,03	1,37
	8	210				710					260,7				
	5	270				762					278,9				
	1	220				700					257,2				
	6	230				680					250,2				
Сталь 45	27	260	244,0	330,0	0,227	665	663,0	370,0	0,237	$\sigma_{1(расч.)} = 0,35\sigma_B + 12,2$	244,95	244,25	601,51	450,03	1,37
	5	220				630					232,70				
	4	230				670					246,70				
	8	260				670					246,70				
	9	250				680					250,2				
Сталь 20	130	250	242,0	920,0	0,227	570	557,0	445,0	0,237	$\sigma_{1(расч.)} = 0,35\sigma_B + 12,2$	211,7	207,15	601,51	450,03	1,37
	138	270				520					194,2				
	135	210				570					211,7				
	133	210				560					208,2				
	134	270				565					209,95				
Бронза БрАЖ-9-4	121	260	230,0	412,5	0,227	465	454,0	1642,0	0,237	$\sigma_{1(расч.)} = 0,47\sigma_B$	218,55	213,38	601,51	450,03	1,37
	122	225				445					209,15				
	123	210				465					218,55				
	124	215				392					184,24				
	125	240				503					236,41				

родность разброса экспериментальных данных оценивали критерием Кохрена ( $KK$ ) [29 – 31]. Для этого находили дисперсии по каждой группе опытов, выбирали максимальную из них и делили на сумму всех дисперсий эксперимента:

$$KK = \frac{\sigma_{S_{-1} \max}^2}{\sum_1^N \sigma_{S_{-1}}^2};$$

здесь  $N$  – число видов материала, использованного в эксперименте.

Затем критерий Кохрена сравнивали с допустимым значением для уровня значимости этого коэффициента, равного 0,05. Результат сравнения свидетельствует о том, что дисперсии дублируемых замеров в эксперименте однородны:  $KK = 0,227 < KK_{\text{доп}} = 0,359$ .

Для оценки адекватности значений предела выносливости, полученных на основе эмиссии волн напряжений, значениям, полученным путем пересчета прочностных показателей материала по известным из литературы формулам [27, 28], в работе был найден критерий Фишера [29 – 31]:

$$KF = \frac{\sigma_{\text{ад}}^2}{\sigma_{\text{экс}}^2},$$

где  $\sigma_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности;  $\sigma_{\text{экс}}^2$  – дисперсия всего эксперимента.

Для этого из экспериментальных данных определили силовые характеристики процесса деформации материала в точке стабилизации эмиссии волн напряжений. Затем определили значения предела прочности материалов  $\sigma_{\text{в}}$ , которые пересчитали в значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  с использованием формул работ [27, 28] (см. таблицу). В результате выявлено, что значения предела выносливости материала, определенные по сигналу ЭВН, адекватны при 5 %-ом уровне значимости пределам выносливости, найденным для каждого из испытываемых образцов материала через предел прочности:  $KF = 1,37 < KF_{\text{доп}} = 2,28$ . Значения предела выносливости, найденного с помощью эмиссии волн напряжений, приведены в таблице.

Метод определения предела выносливости, основанный на регистрации сигнала эмиссии волн напряжений, значительно проще других известных на сегодняшний день методов. По стоимости он сравним с испытанием материала на статическое растяжение. Точность замеров в связи с тем, что ЭВН непосредственно сигнализирует о появлении микропластической деформации, высокая. Аппаратура и установки, на которых можно выполнять такие испытания, близки к стандартным. Все это дает возможность применять предложенный метод в практической деятельности тяжелого машиностроения.

## Выводы

Основываясь на том, что деформируемые металлы являются самоорганизующимися системами с реализацией на разных стадиях их нагружения вполне конкретных диссипативных механизмов, образующих соответствующие дислокационные структуры, в работе для ряда материалов продемонстрирована взаимосвязь интенсивности ЭВН дислокаций со значением предела выносливости материала. Таким образом показана возможность использования сопровождающую формирование дислокационных структур эмиссию волн напряжений в качестве источника информации о протекающих в металле (при его нагружении) процессах и выделении силового значения, при котором достигается предел выносливости данного материала. Использование подхода, основанного на синергетически организованной эмиссии волн напряжений, позволяет на практике оперативно получать значение предела выносливости материалов. Это дает возможность повысить надежность изготавливаемых в тяжелом машиностроении изделий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Школьник Л.М. Методики усталостных испытаний. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
2. Гребенник В.М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования. – М.: Машиностроение, 1969. – 256 с.
3. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Howell F.M., Miller J.L. Axial-stress fatigue strengths of several structural aluminum alloys // Proceeding ASTM. 1955. Vol. 55. P. 955 – 967.
5. Гаврилов Д.А. Корреляционные соотношения между механическими характеристиками в условиях статического и циклического нагружений для конструкционных сталей и сплавов // Проблемы прочности. 1979. № 5. С. 59 – 65.
6. Савельев А.Н., Савельева Е.А., Локтева Н.А. Оценка прочностных свойств материалов элементов технологических машин на основе синергетически организованных сигналов акустической эмиссии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 6. С. 443 – 450.
7. Гурьев А.В., Мишарев Г.М. Особенности процесса начальной стадии пластической деформации при статическом и циклическом нагружениях углеродистой стали // Металловедение и прочность материалов. Т. 3: Тр. Волгоградского политехнического института. – Волгоград: изд. ВПИ, 1971. С. 56 – 64.
8. Усталостная долговечность стали мартенситного класса, модифицированной высокоинтенсивными электронными пучками / Ю.Ф. Иванов, Д.А. Бессонов, С.В. Воробьев и др. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 259 с.
9. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Охсотоев. – М.: Наука, 1995. – 280 с.
10. Конева Н.А., Лычагин Д.В., Жуковский С.П., Козлов Э.В. Эволюция дислокационной структуры и стадии пластического течения поликристаллического железо-никелевого сплава // Физика металлов и металлосведение. 1985. Т. 60. Вып. 1. С. 171 – 179.
11. Зуев Л.Б., Баранникова С.А. Физика прочности и экспериментальная механика: Учебное пособие. – Новосибирск: Наука, 2011. – 350 с.

12. Пат. № 2555506 РФ. Способ регистрации сигналов акустической эмиссии / Е.А. Савельева, А.Н. Савельев. Заявл. 26.03.2014. Бюл. № 19.
13. Использование эмиссии волн напряжений для испытаний материалов изделий / Ю.И. Болотин, В.А. Грешников, А.А. Гусаков, Ю.Б. Дробот. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
14. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
15. Нацик В.Д. Излучение звука дислокацией, выходящей на поверхность кристалла // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8. Вып. 6. С. 324 – 328.
16. Frederick I.R. Dislocation motion as a source of acoustic emission. – In.: Acoustic emission, ASTM STP-505. 1972. P. 129 – 139.
17. Pollock A.A. Stress-wave emission a new tool for industry // Ultrasonics. 1969. Vol. 6(2). 32. P. 88 – 92.
18. Gillis P.P. Dislocation motions and acoustic emission. – In.: Acoustic emission, ASTM STP-505. 1972. P. 20 – 29.
19. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Кривенко Л.Ф. Звуковая эмиссия при аннигиляции дислокационного скопления // Физика твердого тела. 1974. Т. 16. № 4. С. 1233 – 1235.
20. Haken H., Synergetic. An introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in Physics, Chemistry and Biology. 2nd Edition. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1978.
21. Koneva N.A. Self-organization and phase transition in dislocation structure. – In.: Proc. of 9th ICSMA, Israel, Haifa 1991. London: Fluid Publ. Company LTD. 1991. P. 157 – 164.
22. Glasov M., Llanes L.M., Laird C. Self-organized dislocation structures (SODS) in fatigue metals // Phys. Stat. Sol. (a). 1995. Vol. 149. P. 297.
23. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanism and micromechanism // International Materials Reviews. 1992. Vol. 37. No. 2. P. 45 – 76.
24. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 454 с.
25. Mecke K., Blochwitz G., Kremling U. The development of the dislocation structures during the fatigue process of F.C.C. single crystals // Cryst. Res. And Technol. 1982. Vol. 17. No. 12. P. 1557 – 1570.
26. Mugrabi H. Dislocations in fatigue // In dislocation and Properties of Real Materials (Conf. Proc.) – London: The Institute of Metals. 1985. No. 323. P. 244 – 262.
27. Гребенник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования. Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 344 с.
28. Кобаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1991. – 319 с.
29. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 155 с.
30. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Шайхутдинов Д.В. Планирование эксперимента: Учебное пособие. – Новочеркасск: Оникс+, 2007. – 120 с.
31. Рогов В.А., Поздняк Г.Г. Методика и практика технических экспериментов: Учебное пособие. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 288 с.

Поступила в редакцию 29 марта 2018 г.  
 После доработки 19 апреля 2018 г.  
 Принята к публикации 4 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 2, PP. 141–147.

## APPLICATION OF STRESS WAVES EMISSION FOR DETERMINATION OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF MATERIAL

*A.N. Savel'ev, E.A. Savel'eva, D.O. Anisimov, O.D. Prokhorenko*

Siberian State Industrial University, Russia, Kemerovo Region, Novokuznetsk

**Abstract.** Results of experimental evaluation of the fatigue characteristics of tested samples material are considered based on emission of stress waves. Using previously published data on synergistically organized acoustic emission, an experiment was prepared and performed. In experiments on different materials, possibility of using acoustic emission signal for operative determination of mechanical characteristics and, above all, the limit of endurance were demonstrated. Samples for strength testing of materials were made of five steel grades and one grade of Br AZh9-4 bronze. Five experiments were conducted on each of the materials. The samples in the experiment underwent a fine-step loading, at each step of it radiation of signal occurred simultaneously, and another series of dislocations was prepared, that could reach surface of crystal and emit a stress wave at the next moment of loading. Thus, the joint radiation of energy dislocations prepared for movement was already formed. A comparison of experimental data, obtained on the basis of acoustic emission, with calculated values of endurance limit, obtained by empirical formulas through the ultimate strength of this material, performed by the Fisher criterion, has shown their adequacy at a significance level of 5 %. Evaluation of the experimental results of endurance limit determination on basis of acoustic emission by the Cochran test indicates that variances of measurement results in experiment are uniform for all types of used materials. The results have shown that such method on the basis of synergistically organized acoustic emission allows us to quickly obtain experimental values of endurance limit of material with sufficiently high degree of accuracy.

**Keywords:** emission of stress waves, acoustic emission signal, soft-step loading, ultimate endurance of material.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-2-141-147

### REFERENCES

1. Shkol'nik L.M. *Metodiki ustalostnykh ispytaniy* [Fatigue test methods]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 304 p. (In Russ.).
2. Grebennik V.M. *Ustalostnaya prochnost' i dolgovechnost' metallurgicheskogo oborudovaniya* [Fatigue strength and durability of metallurgical equipment]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1969, 256 p. (In Russ.).
3. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. *Nesushchaya sposobnost' i raschet detalei mashin na prochnost'* [Carrying capacity and structural analysis of machine parts]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975, 488 p. (In Russ.).
4. Howell F.M., Miller J.L. Axial-stress fatigue strengths of several structural aluminum alloys. *Proceeding ASTM*. 1955, vol. 55, pp. 955–967.
5. Gavrilov D.A. Correlation between mechanical characteristics under static and cyclic loading conditions for structural steels and alloys. *Problemy prochnosti*. 1979, no. 5, pp. 59–65. (In Russ.).
6. Savel'ev A.N., Savel'eva E.A., Lokteva N.A. Strength properties evaluation of materials of technological machines elements based on the synergistically organized signals of acoustic emission. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 6, pp. 443–450. (In Russ.).
7. Gur'ev A.V., Misharev G.M. Features of the initial stage of plastic deformation under static and cyclic loading of carbon steel. In: *Metallovedenie i prochnost' materialov. T. 3: Tr. Volgogradskogo politekhnicheskogo instituta*. Volgograd: VPI, 1971, pp. 56–64. (In Russ.).

8. Ivanov Yu.F., Bessonov D.A., Vorob'ev S.V. etc. *Ustalostnaya dologovechnost' stali martensitnogo klassa, modifitsirovannoi vysokointensivnymi elektronnyimi puchkami* [Fatigue life of martensitic steel modified with high-intensity electron beams]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2011, 259 p. (In Russ.).
9. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Okhsotoev A.A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow: Nauka, 1995, 280 p. (In Russ.).
10. Koneva N.A., Lychagin D.V., Zhukovskii S.P., Kozlov E.V. Evolution of the dislocation structure and stages of plastic flow of a polycrystalline iron-nickel alloy. *Physics of Metals and Metallography*. 1985, vol. 60, no. 1, pp. 157–166.
11. Zuev L.B., Barannikova S.A. *Fizika prochnosti i eksperimental'naya mekhanika: uchebnoe posobie* [Physics of strength and experimental mechanics: Manual]. Novosibirsk: Nauka, 2011, 350 p. (In Russ.).
12. Savel'eva E.A., Savel'ev A.N. *Sposob registratsii signalov akusticheskoi emissii* [Method of recording for acoustic emission signals]. Patent RF no. 2555506. *Bulleten' izobretenii*. 2014, no. 19. (In Russ.).
13. Bolotin. Yu.I., Greshnikov V.A., Gusakov A.A., Drobot Yu.B. *Ispol'zovanie emissii voln napryazhenii dlya ispytani materialov izdelii* [Using emission of stress waves for testing the products materials]. Moscow: Izd-vo standartov, 1976, 272 p. (In Russ.).
14. Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. *Akusticheskaya emissiya. Primenenie dlya ispytani materialov i izdelii* [Acoustic emission. Application for testing of materials and products]. Moscow: Izd-vo standartov, 1976, 272 p. (In Russ.).
15. Natsik V.D. Radiation of sound by a dislocation that emerges on the surface of a crystal. *Pis'ma v ZhETF*. 1968, vol. 8, no. 6, pp. 324–328. (In Russ.).
16. Frederick I.R. Dislocation motion as a source of acoustic emission. In.: *Acoustic emission, ASTM STP-505*. 1972, pp. 129–139.
17. Pollock A.A. Stress-wave emission a new tool for industry. *Ultrasonics*. 1969, vol. 6 (2), no. 32, pp. 88–92.
18. Gillis P.P. Dislocation motions and acoustic emission. In.: *Acoustic emission, ASTM STP-505*, 1972, pp. 20–29.
19. Boiko V.S., Garber R.I., Krivenko L.F. Sound emission at annihilation of a dislocation cluster. *Fizika tverdogo tela*. 1974, vol. 16, no. 4, pp. 1233–1235. (In Russ.).
20. Haken H. *Synergetic. An introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in Physics, Chemistry and Biology*. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1978.
21. Koneva N.A. Self-organization and phase transition in dislocation structure. In.: *Proc. of 9th ICSMA, Israel, Haifa 1991*. London: Fruid Publ. Company LTD, 1991, pp. 157–164.
22. Glasov M., Llanes L.M., Laird C. Self-organized dislocation structures (SODS) in fatigue metals. *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1995, vol. 149, pp. 297.
23. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanism and micromechanism. *International Materials Reviews*. 1992, vol. 37, no. 2, pp. 45–76.
24. Ivanova V.S., Terent'ev V.F. *Priroda ustalosti metallov* [Nature of metal fatigue]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 454 p. (In Russ.).
25. Mecke K., Blochwitz G., Kremling U. The development of the dislocation structures during the fatigue process of F.C.C. single crystals. *Cryst. Res. And Technol.* 1982, vol. 17, no. 12, pp. 1557–1570.
26. Mugrabi H. Dislocations in fatigue. In: *Dislocation and Properties of Real Materials (Conf. Proc.)*. London: The Institute of Metals, 1985, no. 323, pp. 244–262.
27. Grebennik V.M., Tsapko V.K. *Nadezhnost' metallurgicheskogo oborudovaniya. Spravochnik* [Reliability of metallurgical equipment. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 344 p. (In Russ.).
28. Kogaev V.P., Drozdov Yu.N. *Prochnost' i iznosostoikost' detalei mashin* [Strength and wear resistance of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 319 p. (In Russ.).
29. Adler Yu.P. *Vvedenie v planirovanie eksperimenta* [Introduction to experiment planning]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 155 p. (In Russ.).
30. Gorbatenko N.I., Lankin M.V., Shaikhutdinov D.V. *Planirovanie eksperimenta: Uchebnoe posobie* [Experiment planning: Manual]. Novocherkassk: Oniks+, 2007, 120 p. (In Russ.).
31. Rogov V.A., Pozdnyak G.G. *Metodika i praktika tekhnicheskikh eksperimentov: Uchebnoe posobie* [Method and practice of technical experiments: Textbook]. Moscow: Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 2005, 288 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**A.N. Savel'ev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (savel'yev2000@mail.ru)

**E.A. Savel'eva**, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Mechanics and Machine Engineering

**D.O. Anisimov**, Postgraduate of the Chair of Mechanics and Machine Engineering

**O.D. Prokhorenko**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair "Thermal Power and Ecology" (kafedra-TEE@yandex.ru)

Received March 29, 2018

Revised April 19, 2018

Accepted May 4, 2018