

УДК 620.172.24:534.6

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫХ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Савельев А.Н.¹, к.т.н., доцент кафедры механики и машиностроения (Savelyev2000@mail.ru)

Савельева Е.А.¹, соискатель степени к.т.н. кафедры механики и машиностроения

*Локтева Н.А.², к.т.н., доцент кафедры сопротивления материалов
и динамики прочности машин*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
(125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)

Аннотация. Одной из основных задач металлургического машиностроения при создании и эксплуатации технологического оборудования является обеспечение необходимых показателей его надежности. Достижение надежности оборудования при его изготовлении связано с оперативным определением прочностных характеристик используемых при этом материалов и прежде всего их предела выносливости. В работе в качестве параметра оценки предела выносливости материалов используется сигнал акустической эмиссии. Для получения устойчивого сигнала, основываясь на результатах анализа синергетических процессов, протекающих в различных физических средах лазеров и мазеров, применен подход получения синергетического сигнала эмиссии волн напряжений (ЭВН) на базе дислокационной среды. Это позволило обеспечить достаточно мощный эмиссионный сигнал, характеризующий процесс движения дислокаций при формировании тех или иных дислокационных субструктур. Эксперимент, проведенный на образцах из стали, подтверждает тот факт, что использование организованного путем мелко-ступенчатого растяжения образца акустического сигнала позволяет оценить внутренние процессы, происходящие в материалах. Результаты эксперимента дают возможность выделить участки упруго-пластической деформации материала с различной скоростью движения дислокаций. Основываясь на том, что деформируемые металлы являются самоорганизующимися системами с реализацией на разных стадиях их нагружения различных диссипативных механизмов, образующих соответствующие дислокационные структуры, установлена взаимосвязь интенсивности ЭВН со структурными особенностями дислокационных субструктур (ДСС). Одновременно сопоставлен момент изменения интенсивности ЭВН с пределом его выносливости. Это позволяет использовать сопровождающую формирование дислокационных структур эмиссию волн напряжений совместно с фиксацией возникающего в материале образца напряжения для определения предела выносливости.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, дислокации, напряжения, предел выносливости, технологическое оборудование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-443-450

При создании и эксплуатации технологического металлургического оборудования одной из основных задач является обеспечение необходимых показателей его надежности. Возможный путь достижения положительных результатов при решении этой задачи связан с оперативным, достаточно точным определением прочностных характеристик используемых при изготовлении оборудования конструкционных материалов. Наиболее важным для машиностроения показателем прочностных свойств материала является его предел выносливости. Это связано с тем, что основные прочностные расчеты элементов машин и механизмов технологического оборудования ведутся с участием именно этого показателя. В настоящее время предел выносливости материала определяется либо путем пересчета его других прочностных показателей [1 – 3], либо путем достаточно длительных и трудоемких экспериментов [4 – 6]. Разработанные и используемые на сегодняшний день подходы не позволяют в дальнейшем значительно улучшить существующее положение дел, связанное с оцен-

кой материалов на усталостную прочность. В силу этого требуется значительное переосмысление подходов к выявлению различных стадий самого процесса накопления повреждений в конструкционных материалах и нахождение других возможностей замера их прочностных характеристик в ограниченный временной период изготовления элементов металлургических машин.

Известно, что усталостное разрушение материала машин происходит не мгновенно при достижении нагрузки на деталь предельных значений, а является длительным процессом накопления повреждений: зарождения и развития несплошностей типа микротрещин с последующим объединением их в трещины. При этом, как показывают исследования [7], процессы, протекающие на структурном уровне при начальной стадии циклического нагружения и статическом нагружении, идентичны. А это значит, что для выделения точек изменения доминирующего механизма накопления повреждений при циклическом нагружении достаточно одного (статического) этапа нагружения образца.

Такое утверждение связано с тем, что деформируемое твердое тело является самоорганизующейся системой. В процессе релаксации последней происходит самоорганизация диссипативных структур с самопроизвольной их перестройкой вблизи точек бифуркации. Эти перестройки представляют собой последовательность кинетических переходов, при которых случайность, неравновесность и необратимость являются основой порядка в системе [8].

На микро- и мезоуровне характерным признаком нелинейного поведения деформируемого металла является спонтанная перестройка дислокационных субструктур. Внутренним параметром системы, определяющим изменение субструктур, служит скалярная плотность дислокаций или связанная с нею плотность энергии упругой деформации материала. При циклическом нагружении та или иная плотность дислокаций в субструктуре определяет скорость формирования постепенного накопления повреждений, но при этом процессы движения дислокаций в материале сопоставимы с движением дислокаций при статическом их нагружении.

В работах [8, 9] по мере накопления в материале повреждений выделяются пороговые значения плотности дислокаций, определяющие изменение механизма формирования дислокационных структур. Наименее плотной структурой дислокаций в металлах при их нагружении является хаотическая, за которой следует клубковая ее форма. Переход от клубковой структуры к ячеистой происходит при плотности дислокаций порядка $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$, от ячеистой к полосовой – при $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и от полосовой к фрагментированной – при $\rho = 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Окончательно сформированная одним образом структура является 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. Появление в системе иерархической последовательности дислокационных структур все новых и новых дефектов, необходимых для организации диссипации упругой энергии в материале, является фундаментальным диссипативным механизмом упруго-пластичных материалов. При этом диссипативные механизмы, контролирующие переход структуры из одного устойчивого состояния в другое, а также иерархическая смена диссипативных структур инвариантны к внешним условиям нагружения [8]. Это представление о поведении структуры металлов во время их нагружения позволяет сформировать новые подходы к выявлению особенностей процессов, протекающих в структуре материала.

Один из основных механизмов необратимого структурного изменения металлов и сплавов обусловлен движением и локализацией в них дислокаций. Именно они способствуют образованию усталостных трещин [10, 13]. При этом наличие локальных полей на-

пряжений вокруг дислокаций при достаточно высокой скорости их движения создает необходимые условия для возникновения акустической эмиссии [14, 15, 17 – 19]. Но в рамках настоящей работы важен не сам факт возникновения акустического сигнала, а та информация, которую этот сигнал несет напрямую из точки локального повреждения материала. Эта информация позволяет судить о величине и моменте возникновения того или иного вида повреждений, включая повреждения, возникающие при достижении нагрузки на материал, соответствующей пределу его выносливости.

Такой подход исходит из того, что любые структурные изменения материалов, в случае локального изменения внутренних напряжений при их достаточно высокой скорости, вызывают вполне определенную акустическую эмиссию. По представлениям Коттрелла [16] процесс возникновения механических волн при движении дислокаций происходит следующим образом. В структурах с плотной упаковкой атомов нарушения правильности их расположения создают у центра дислокации менее плотную упаковку, т. е. происходит увеличение удельного объема в этой части тела. Размеры и форма этой зоны расширения при движении дислокации со скоростью v меняются с частотой $\nu = \frac{v}{b}$, где b – параметр решетки в направлении движения дислокации. В окружающую среду от этой зоны распространяется волна с частотой ν . Регистрация параметров волны акустической эмиссии дает достаточно информативное представление о событии, связанном с движением дислокаций.

Однако регистрация и анализ этих единичных волн вызывают значительные трудности, связанные с тем, что они обладают низкой энергией. Кроме этого, из-за высокой частоты колебаний сигналов распространение сигнала в реальных материалах обладает высоким декрементом затухания. 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. При этом известно [20], что более высокую энергию упругих волн, а также более четкий сигнал акустической эмиссии обеспечивает движение скоплений дислокаций. Происходит это тогда, когда при движении дислокаций имеет место их местная задержка у различных препятствий, преодоление которых приводит к быстрым местным сдвигам. Накопленная при этом от группы дислокаций энергия освобождается в виде достаточно мощной для ее анализа упругой волны. Таким образом, для усиления сигнала акустической эмиссии необходимо организовать коллективный на достаточно малом временном периоде Δt акустический сигнал. Использовать для такой организации сигнала можно синергетические представления об уже известных в физике на сегодняшний день коллективных или синергетических эффектах [21].

Наиболее ярким примером реализации синергетического процесса является лазерный процесс. В силу этого рассмотрим организацию излучения в лазере и его прототипе мазере с целью использования механизма организации в этих устройствах светового и инфракрасного когерентного излучения для организации сигнала акустической эмиссии в материалах. Как известно, лазеры и мазеры – это квантовые генераторы когерентного и монохроматического электромагнитного излучения оптического и инфракрасного диапазонов. Оба типа устройств работают на основе эффекта вынужденного (индуцированного или стимулированного) излучения. Этот эффект есть результат взаимодействия электромагнитной волны с атомами вещества, через которое проходит волна. Реализуется этот процесс следующим образом [22].

В лазере, получая энергию за счет нагрева вещества, пропускания электрического тока или других источников, электроны атома рабочего вещества с уровнем энергии E_1 (рис. 1, а) переходят на более высокий уровень E_2 (рис. 1, б). Возвращаясь на нижний, основной уровень, электроны испускают фотоны (рис. 1, в). Энергию фотонов и, следовательно, их частоту ν определяет разность уровней энергии: $\Delta E = h\nu$, где h – постоянная Планка. На нижний уровень электрон может опуститься по одному из двух сценариев: либо самопроизвольно (спонтанно), либо за счет взаимодействия с посторонним фотоном, имеющим ту же энергию ΔE . Во втором случае (рис. 1) излучение атома называется индуцированным. Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров, а элементами, накапливающими и отдающими энергию, являются электроны.

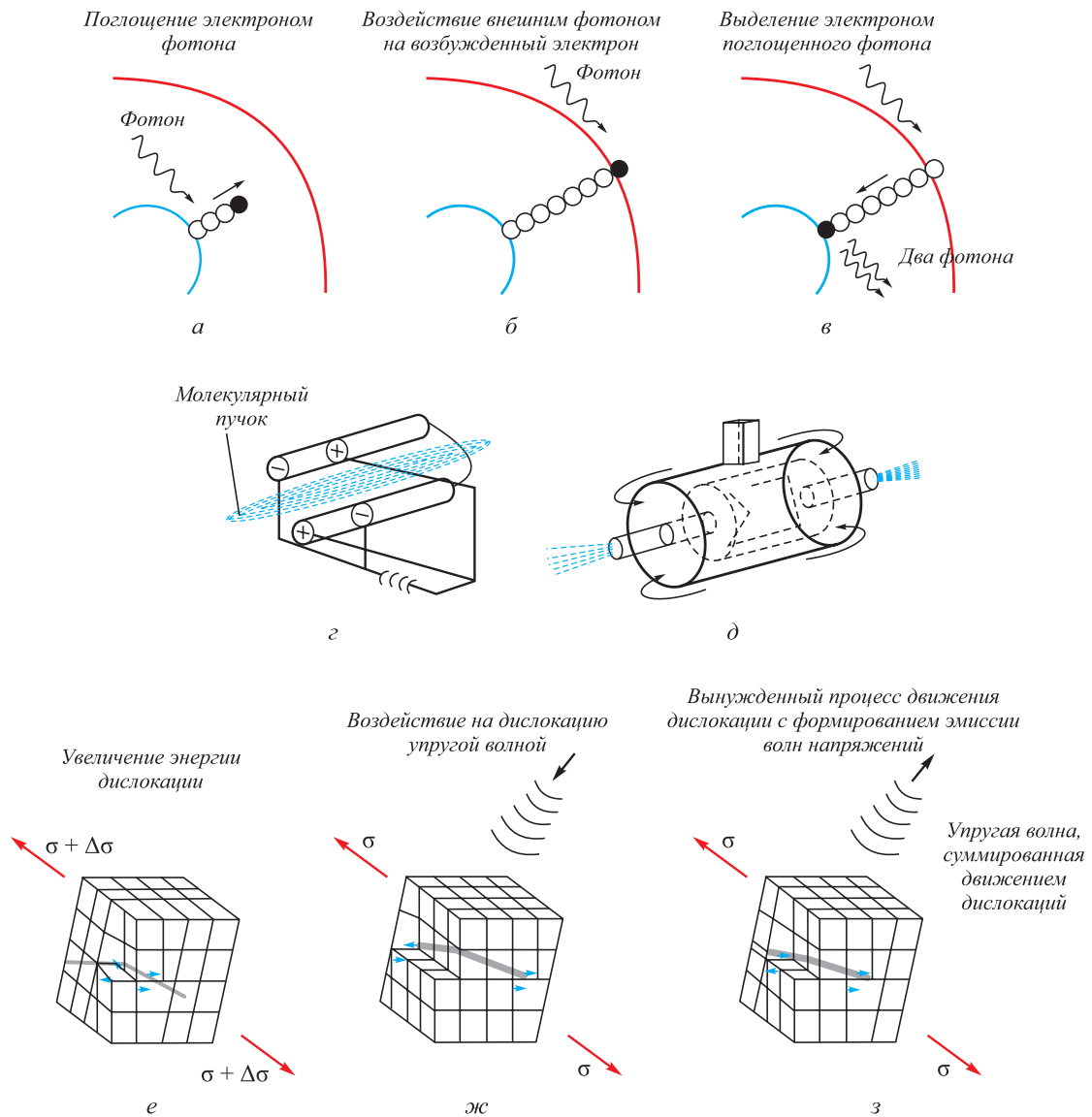


Рис. 1. Синергетический эффект организации сигнала на примере лазера (а – в) и мазера (г, д) и возможность его применения для организации суммарного сигнала акустической эмиссии (е – з)

Fig. 1. Synergetic effect of the signal organization on the example of a laser (a – в) and a maser (г, д) and the possibility of its application for organizing the total signal of acoustic emission (е – з)

В мазерах в качестве элементов-носителей энергии используются не электроны, как в лазерах, а молекулы. Процесс когерентного излучения в мазере основан на том, что рабочая среда, находящаяся в термодинамическом равновесии, имеет распределение молекул по их энергетическому состоянию в виде закона Больцмана. Для того, чтобы увеличить количество возбужденных молекул искусственно, создается термодинамически неравновесная среда, в которой число возбужденных молекул будет больше, чем невозбужденных. В мазерах на молекулярных пучках, или в молекулярных генераторах, такую среду создают путем искусственного отбора из пучка молекул, находящихся в термодинамическом равновесии, только тех молекул, которые находятся в возбужденном состоянии (рис. 1, з). При последующем пропускании молекулярной среды через резонатор происходит синхронизация колебательного процесса молекул и при последующем их резанировании перемещение элементов рабочей среды на более низкие энергетические уровни (рис. 1, д). При этом высвобожденная в виде фотонов энергия заставляет еще большее число молекул испустить фотоны, что приводит к цепной реакции перехода атомов в невозбужденное состояние с практически одновременным высвобождением громадного количества фотонов.

И в лазере, и в мазере реализуется один и тот же механизм. Энергия, запасенная в результате заселенности высоких энергетических уровней носителями энергии – электронами или молекулами, – высвобождается синхронно под воздействием входного сигнала, благодаря чему получается усиление энергии сигнала. При использовании подобного механизма усиления сигнала акустической эмиссии в металлах носителем энергии могут выступить дислокационные структуры [21].

Энергетическое состояние дислокаций может быть увеличено путем повышения потенциальной энергии среды, в которой существуют дислокации. Это может быть достигнуто за счет разделения всего возможного диапазона изменения потенциальной энергии материала на уровни с последующим ступенчатым увеличением напряжения материала на величину $\Delta\sigma$. Увеличение потенциальной энергии дислокаций будет изменяться в соответствии с выражением $\Delta\Pi = \varphi \left(\frac{\Delta\sigma^2}{2E} \right)$, где σ – напряжение в материале, Па; E – модуль упругости первого рода, Па. При этом количество дислокаций n_i , способных осуществить свое движение к поверхности кристалла с последующей эмиссией волн напряжений, определится диапазоном изменения потенциальной энергии $\Delta\Pi_i$. Итак, при увеличении ступенчатым образом напряжения в металлическом образце активируется очередная группа n_i дислокаций, способных осуществить свое движение в массиве кристалла с последующим испусканием волн напряжений звукового диапазона. Обеспечивается синхронный выход данной группы из n_i дислокаций на поверхность кристаллов

металла при помощи запуска вдоль испытуемого образца упругой волны. Взаимодействуя с подготовленными к движению дислокациями, упругая волна обеспечивает их синхронный выход на поверхность кристаллов металла и таким образом синхронное излучение группы единичных эмиссионных сигналов. В этом случае мощность эмиссионного сигнала будет определяться средней мощностью сигнала от единичной дислокации e_i , умноженной на количество источников такого излучения n_i :

$$E_i = e_i n_i.$$

При этом частота интегрированного сигнала останется соответствующей частоте единичной эмиссии волны напряжений.

Организация одновременного процесса накачки энергии в область расположения дислокаций и процесса формирования управляющей коллективным выходом дислокаций упругой волны вдоль испытуемого образца может быть реализована путем мелкоступенчатого нагружения образца [23]. При мелкоступенчатом растяжении образца металла при каждом импульсном приросте напряжения активируется до максимального уровня очередная серия дислокаций n_i . Одновременно формируется и упругая волна напряжений, которая распространяется вдоль испытуемого на растяжение образца. Взаимодействие этой волны с дислокациями, которые были активированы во время предыдущего шага нагружения и которые находятся к этому моменту в возбужденном состоянии, обеспечивает их коллективное движение с коллективной эмиссией волн напряжений. Таким образом, внутренние процессы в металле, соответствующие данному уровню напряжений, фиксируются при помощи регистрации амплитуды колебаний волн напряжений.

Такой подход к организации мощного эмиссионного сигнала в металлических образцах был реализован в лабораторном эксперименте. В качестве испытательного стенда использовалась специальным образом модернизированная испытательная машина УММ-20. В этой машине была заменена часть элементов ее привода для обеспечения ступенчатого движения плунжера привода при испытании образцов на растяжение. В опытах цилиндрические образцы диам. 15 мм и длиной цилиндрической части 90 мм растягивались ступенчато со средней скоростью 2,5 мм/с. Установка образца в процессе его растяжения показана на рис. 2.

Усилие растяжения образца 1 замерялось с помощью цилиндрической мессдозы 2. Деформация образцов фиксировалась ходомером 3. В качестве преобразователя волн напряжений использовался акселерометр КД-10 с поперечным коэффициентом направленности 5 %. Акселерометр 4 устанавливался посередине длины образца перпендикулярно оси растяжения. Крепление акселерометра выполнялось с помощью специального хомута 5. Низкий коэффициент поперечной направ-

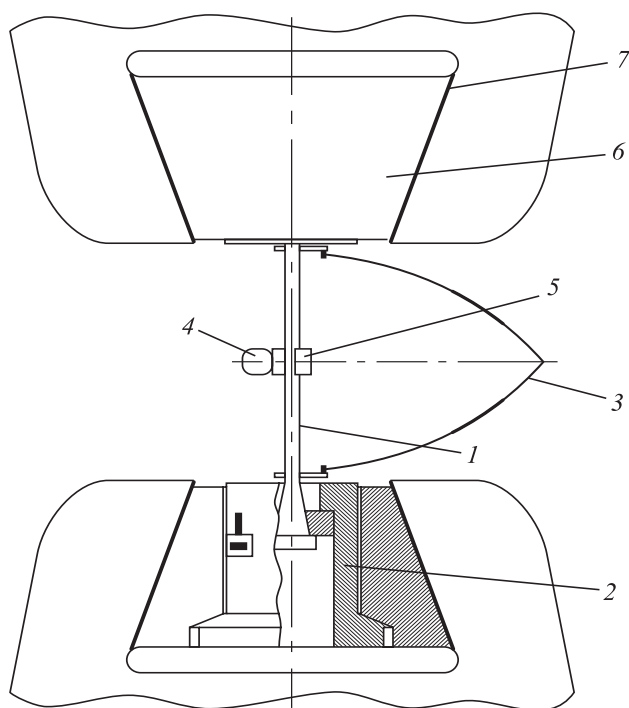


Рис. 2. Установка образца и размещение измерительных приборов в испытательной машине

Fig. 2. Sample installation and placement of measuring instruments in a test machine

ленности при такой установке акселерометра позволили значительно уменьшить воспринимаемость им шумов прессы. Чувствительность же акселерометра к восприятию эмиссионных волн напряжений, распространяемых перпендикулярно оси образца при этом остается максимальной. Для снижения уровня шумов, передаваемых гидравлической частью прессы на образец, призмы прессы 6 устанавливались через прокладки 7.

В результате принятых мер уровень шумов, воспринимаемых акселерометром, получился низким, что позволило устойчиво фиксировать волны напряжений. Сигнал с акселерометра подавался через прибор SDM-132 на записывающее устройство. Величина сигнала характеризовала энергию каждого из суммарных импульсов эмиссии волн напряжений и оценивалась через ускорение нарастания фронта этой волны.

Пример записи эмиссии волн напряжений, усилия и деформации образца из стали 45, а также расшифровка этой записи показаны на рис. 3, из которого видно, что при достижении определенного момента в процессе растяжения образца энергия сигнала начинает возрастать. Интенсивность нарастания сигнала эмиссии волн напряжений в процессе нагружения образца неоднородна. На кривой изменения энергии сигнала ЭВН можно выделить три характерные точки. В качестве первой точки можно взять момент появления сигнала ЭВН (точка B на рис. 3), соответствующий относительной деформации образца $\epsilon = 0,03$. Начиная с этой точки, происходит плавное нарастание мощности ЭВН.

Второй характерной точкой является точка перехода от плавного возрастания величины сигнала к более крутому его изменению (точка C на рис. 3). Эта точка соответствует значению $\epsilon = 0,07$. Третья характерная точка D – это точка перехода от участка крутого возрастания сигнала к его неизменной величине. В этом случае $\epsilon = 0,09$. Появление этих точек и соответственно участков между ними связано с особенностями процессов, протекающих в дислокационной структуре металлов.

Относительные деформации материала и объемная доля (%), занятая в металле тем или иным типом дисло-

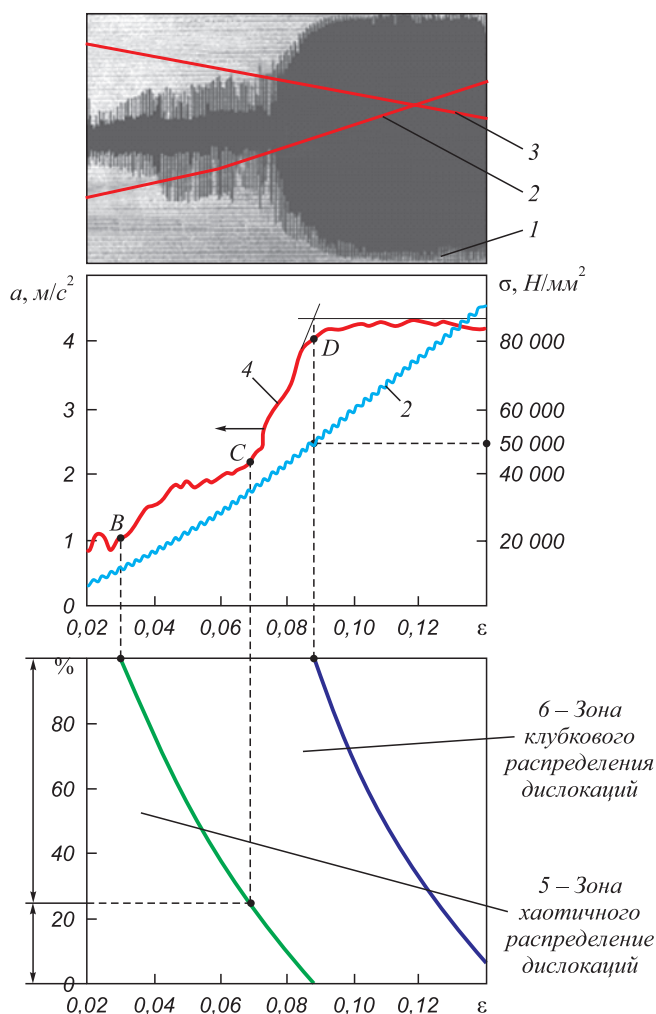


Рис. 3. Осциллограмма записи акустических сигналов при квазимпульсном нагружении образца:

1 – величина сигнала эмиссии волн напряжений; 2 – величина напряжения в испытываемом образце; 3 – величина деформации образца; 4 – огибающая импульсов акустического сигнала; 5 – зона хаотического распределения дислокаций в образце; 6 – зона клубкового распределения дислокаций в образце

Fig. 3. Oscillogram of recording the acoustic signals during quasimomentum loading of the sample:

1 – signal magnitude of the stress waves emission; 2 – magnitude of stress in the test sample; 3 – value of sample deformation; 4 – pulses envelope of the acoustic signal; 5 – zone of random distribution of dislocations in the sample; 6 – zone of the coil distribution of dislocations in the sample

кационной субструктуры, по своей сути являются критериями подобия процессов, происходящих в металле на дислокационном уровне. Это позволяет сопоставить результаты, полученные в эксперименте с акустической эмиссией, с результатами оценки изменения субструктур дислокаций при деформации металла, полученными в работах [9, 24 – 27]. Сопоставление кривой изменения эмиссии волн напряжений $a = f(\epsilon)$ с диаграммами структурных состояний материала при его деформации свидетельствует о том, что на каждой стадии деформации материала существуют, как правило, два типа дислокационных структур. При этом доля одного вида ДСС убывает, а второго – возрастает. В точке *B* (рис. 3), где появляется сигнал ЭВН, начинается уменьшение первой стадии ДСС, стадии с хаотическим распределением дислокаций, и развитие второй стадии – клубковой. В точке *C* при возрастании интенсивности ЭВН объем клубковой структуры ДСС достигает 75 %, что дает возможность предположить, что увеличение сигнала ЭВН связано с доминированием процессов движения дислокаций в клубковой ДСС. В точке *D*, когда интенсивность ЭВН стабилизируется, в материале весь 100 %-ный объем занимают клубки дислокационной структуры.

Для прочностной оценки этого момента интересно знать, какое значение в этой точке имеет напряжение материала. Определив силовую характеристику процесса деформации материала в точке *D* и пересчитав значение предела текучести σ_T , полученное в эксперименте, в значение предела выносливости σ_{-1} по формуле $\sigma_{-1} = 0,45\sigma_T + 122$, взятой из работы [22], было выявлено, что эти значения напряжений близки. Полученный результат позволяет предположить, что напряжение предела выносливости соответствует моменту деформации материала, при котором клубковая структура ДСС занимает весь объем материала, а эмиссия волн напряжений переходит от этапа возрастания ее значения к этапу стабилизации этого значения.

Таким образом, основываясь на том, что деформируемые металлы являются самоорганизующимися системами с реализацией на разных стадиях их нагружения различных диссипативных механизмов, образующих соответствующие дислокационные структуры, установлена взаимосвязь интенсивности ЭВН со структурными особенностями ДСС. Одновременно была сопоставлена интенсивность ЭВН с одной из силовых характеристик материала – с пределом его выносливости. В силу этого появляется возможность использовать сопровождающую формирование структур эмиссию волн напряжений в качестве источника информации о протекающих в металле процессах при его нагружении.

Выводы. На основании результатов анализа синергетических процессов, протекающих в различных физических средах лазеров и мазеров, данный подход был распространен на дислокационную среду с целью

получить мощный сигнал эмиссии волн напряжений. Это позволило обеспечить достаточно мощный эмиссионный сигнал, характеризующий процесс движения дислокационных структур металла в процессе его нагружения. Эксперимент, проведенный на образцах из стали, подтверждает тот факт, что использование синергетически организованной акустической эмиссии позволяет зарегистрировать сигнал и оценить внутренние процессы, происходящие в материалах при их специальным образом организованном мелкоступенчатом нагружении. Результат эксперимента позволяет выделить участки упруго-пластической деформации материала с различной скоростью движения дислокаций и различной интенсивностью нарастания скорости движения дислокаций. При этом значительная по величине мощность сигнала акустической эмиссии свидетельствует о том, что синергетический механизм организации эмиссионного сигнала на дислокационном уровне в металлах реализуем. Эмиссионный сигнал позволяет выделить момент перехода к стабильному и интенсивному движению дислокаций и, соответственно, накоплению в материале повреждений. Этот момент нагружения материала сопоставим с пределом его выносливости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. – М.: Оборонгиз, 1952. – 555 с.
2. Школьник Л.М. Методики усталостных испытаний. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
3. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
4. 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.
5. Prot E.M. L'essai des fatigue Sous Charge Progressive. Une nouvelle technique d'essai des matériaux // Rev. Metallurgia. 1948, Vol. 45. No. 12. P. 481. L'essai des fatigue Sous Charge Progressive. Une nouvelle technique d'essai des matériaux.
6. Enomoto N.A. A method for determining the fatigue limit of metal by means of stepwise load increase test // Proc. ASTM. 1959. Vol. 59. P. 263 – 271.
7. Гурьев А.В., Мишарев Г.М. Особенности процесса начальной стадии пластической деформации при статическом и циклическом нагружениях углеродистой стали. – В кн.: Металловедение и прочность материалов. Том 3. Труды Волгоградского политехнического института. – Волгоград: изд. ВПИ, 1971. С. 56 – 64.
8. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Охотоев. – М.: Наука, 1995. – 280 с.
9. 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 металловедение. 1985. Т. 60. Вып. 1. С. 171 – 179.
10. Locati L. Le prove di fatica come ausilio alla progettazione ed alla produzione // Metallurgia Italiana. 1955. Vol. 47. No. 9, P. 301 – 308.
11. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1981. – 344 с.
12. Cottrell A.H. Dislocations and plastic flow in crystals. – New York Oxford Univ. Press., 1953.

13. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций / Пер. с англ. под ред. Э.М. Надгорного, Ю.А. Осипьяна. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
14. Болотин Ю.И., Грешников В.А., Гусаков А.А., Дробот Ю.Б. Использование эмиссии волн напряжений для неразрушающего контроля материалов // Дефектоскопия. 1971. № 6. С. 5 – 25.
15. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
16. Наик В.Д. Излучение звука дислокацией, выходящей на поверхность кристалла // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8. Вып. 6. С. 324 – 328.
17. Frederick I.R. Dislocations motion as a source of acoustic emission. – In: Acoustic Emission, ASTM STP-505. 1972. P. 129 – 139.
18. Pollock A.A. Stress-wave emission a new tool for industry // Ultrasonics. 1969. Vol. 6(2). 32. P. 88 – 92.
19. Gillis P.P. Dislocation motions and acoustic emission. – In: Acoustic Emission, ASTM STP-505. 1972. P. 20 – 29.
20. 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.
21. Haken H., Synergetic. An Introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in Physics, Chemistry and Biology. 2nd Edition., Springer-Verlag Berlin – Heidelberg New York, 1978.
22. Назарова Г.В., Рыбьянец В.А. Квантовые усилители и генераторы: учебн. пособие. – Новокузнецк: изд. СибГГМА, 1997. – 60 с.
23. Пат. № 2555506 РФ. Способ регистрации сигналов акустической эмиссии / Е.А. Савельева, А.Н. Савельев. Заявл. 26.03.2014. Бюл. № 19.
24. 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.
25. Koneva N.A. Self-organization and phase transition in dislocation structure. – In: Proc. of 9th ICSMA, Israel, Haifa 1991. Fruid Publ. Company LTD. London, 1991. P. 157 – 164.
26. Winter A.T., Pederson O.B., Rasmussen K.V. Dislocation microstructures in fatigue copper polycrystals // Acta met. 1981. Vol. 29. P. 735 – 748.
27. Winter A.T. Dislocation structure in the interior of fatigued copper polycrystal // Acta met. 1980. Vol. 28. P. 963 – 964.

Поступила 8 февраля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 6, pp. 443–450.

STRENGTH PROPERTIES EVALUATION OF MATERIALS OF TECHNOLOGICAL MACHINES ELEMENTS BASED ON THE SYNERGETICALLY ORGANIZED SIGNALS OF ACOUSTIC EMISSION

*A.N. Savel'ev*¹, *E.A. Savel'eva*¹, *N.A. Lokteva*²

REFERENCES

¹ Siberian State Industrial University, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

Abstract. One of the main tasks of metallurgical engineering when creating and operating technological equipment is to provide the necessary indicators of its reliability. Achieving the reliability of equipment during its manufacture is associated with the operational determination of the strength characteristics of the used materials, and, above all, their endurance limit. In this paper, the acoustic emission signal is used as a parameter for estimating the endurance limit of materials. To obtain a stable signal, based on the results of an analysis of the synergistic processes taking place in various physical media of lasers and masers, the approach of obtaining a synergistic signal EVN on the basis of dislocation medium has been applied. This made it possible to provide a sufficiently powerful emission signal characterizing the motion of dislocations during the formation of certain dislocation substructures. The experiment carried out on steel samples confirms the fact that using an organized fine-graded stretching of an acoustic signal sample allows the internal processes taking place in the materials to be evaluated. The results of the experiment make it possible to isolate the areas of elastoplastic deformation of the material with different dislocation velocities. Based on the fact that the deformable metals are self-bound systems with the realization of their loading of various dissipative mechanisms at different stages, that form the corresponding dislocation structures, relation between the intensity of EVN and the structural features of the BCS was established. Simultaneously, the time of change in the intensity of the EVN is compared with the limit of its endurance. This makes it possible to use the stresses emission accompanying the formation of dislocation structures together with the fixation of the voltage that arises in the material of the sample to determine the limit of endurance.

Keywords: acoustic emission, dislocation, stress, endurance limit, technological equipment.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-443-450

1. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow: Oborongiz, 1952, 555 p. (In Russ.).
2. Shkol'nik L.M. *Metodiki ustalostnykh ispytaniy* [Fatigue test methods]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 304 p. (In Russ.).
3. Markovets M.P. *Opreделение mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdsti* [Determination of the mechanical hardness properties of metals]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 191 p. (In Russ.).
4. Gavrilov D.A. Correlation relations between mechanical characteristics under static and cyclic loading conditions for structural steels and alloys. *Problemy prochnosti*. 1979, no. 5, pp. 59–65. (In Russ.).
5. Prot E.M. L'essai des fatigue Sous Charse Progressive. Une nouvelle technique d'essai des matériaux. *Rev. Metallurgia*. 1948, vol. 45, no. 12, pp. 481.
6. Enomoto N.A. A method for determining the fatigue limit of metal by means of stepwise load increase test. *Proc. ASTM*. 1959, vol. 59, pp. 263–271.
7. Gur'ev A.V., Misharev G.M. Features of initial stage process of plastic deformation under static and cyclic loads of carbon steel. In: *Metallovedenie i prochnost' materialov. T. 3. Trudy volgogradskogo politekhnicheskogo instituta* [Metallurgy and strength of materials. Vol. 3. Proceedings of Volgograd Polytechnic Institute]. Volgograd: VPI, 1971, p. 56–64. (In Russ.).
8. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Okhsotoev A.A. *Sinergitika i fraktaly v materialovedenii* [Synergy and fractals in material science]. Moscow: Nauka, 1995, 280 p. (In Russ.).
9. 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.
10. Locati L. Le prove di fatica come ausilio alla progettazione ed alla produzione. *Metallurgia Italiana*. 1955, vol. 47, no. 9, pp. 301–308.
11. Troshchenko V.T. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogotsiklovom nagruzhении* [Deformation and fracture of metals under multicyclic loading]. Kiev: Naukova dumka, 1981, 344 p. (In Russ.).

12. Cottrell A.H. *Dislocations and plastic flow in crystals*. New York: Oxford Univ. Press., 1953.
13. Hirth D., Lothe I. *Theory of dislocations*. Oxford. 1972. (Russ.ed.: Hirth D., Lothe I. *Teoriya dislokatsii*. Moscow: Atomizdat, 1972, 600 p.).
14. Bolotin Yu.I., Greshnikov V.A., Gusakov A.A., Drobot Yu.B. Using the emission of stress waves for non-destructive material control. *Defektoskopiya*. 1971, no. 6, pp. 5–25. (In Russ.).
15. Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. *Akusticheskaya emissiya. Primeniye dlya ispytaniy materialov i izdelii* [Acoustic emission. Application for testing of materials and products]. Moscow: Izd-vo standartov, 1976, 272 p. (In Russ.).
16. Natsik V.D. Radiation of sound by a dislocation that emerges on the surface of a crystal. *Pis'ma v ZhETF*. 1968, Vol. 8, Part 6, pp. 324–328. (In Russ.).
17. Frederick I.R. Dislocations motion as a source of acoustic emission. In.: *Acoustic Emission*. ASTM STP-505. 1972, pp. 129–139.
18. Pollock A.A. Stress-wave emission a new tool for industry. *Ultrasonics*. 1969, vol. 6(2). 32, pp. 88–92.
19. Gillis P.P. Dislocation motions and acoustic emission. In: *Acoustic Emission*. ASTM STP-505. 1972, pp. 20–29.
20. Boiko V.S., Garber R.I., Krivenko L.F. Sound emission during the annihilation of a dislocation cluster. *Fizika tverdogo tela*. 1974, vol. 16, no. 4, pp. 1233–1235. (In Russ.).
21. Haken H., Synergetic. *An Introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in Physics, Chemistry and Biology*. 2nd Ed., Springer-Verlag Berlin – Heidelberg New York, 1978.
22. Nazarova G.V., Rybyanets V.A. *Kvantovye usiliteli i generatory: uchebn. posobie* [Quantum amplifiers and generators: Learners guide]. Novokuznetsk: SibGGMA, 1997, 60 p. (In Russ.).
23. Savel'eva E.A., Savel'ev A.N. *Sposob registratsii signalov akusticheskoi emissii* [Method for recording the acoustic emission signals]. Patent no. 2555506 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2014, no. 19. (In Russ.).
24. 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.
25. Koneva N.A. Self-organization and phase transition in dislocation structure. In: *Proc. of 9th ICSMA, Israel, Haifa 1991*. Fruid Publ. Company LTD. London, 1991, pp. 157–164.
26. Winter A.T., Pederson O.B., Rasmussen K.V. Dislocation microstructures in fatigue copper polycrystals. *Acta met.* 1981, vol. 29, pp. 735–748.
27. Winter A.T. Dislocation structure in the interior of fatigued copper polycrystal. *Acta Met.* 1980, vol. 28, pp. 963–964.

Information about the authors:

A.N. Savel'ev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (Savelyev2000@mail.ru)
E.A. Savel'eva, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Mechanics and Machine Engineering
N.A. Lokteva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Strength of Materials and Strength Dynamics of Machines

Received 8 February, 2017