



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-30
ОНФ

Ю.М. Сапунов*

**МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН
ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
В НАГРУЖЕННЫХ ТЕЛАХ**

Направлено в *ЖЭТФ*

* E-mail: Sapunov@mx.ihep.su

Протвино 1998

Аннотация

Сапунов Ю.М. Механизм образования микротрещин ионизирующим излучением в нагруженных телах: Препринт ИФВЭ 98-30. – Протвино, 1998. – 7 с., библиогр.: 14.

В работе представлены результаты исследования прохождения заряженных частиц через твердые тела, находящиеся под механической нагрузкой. На основе кинетической теории прочности показывается, что атомы отдачи, возникающие при упругих столкновениях, и δ -электроны способны генерировать микротрещины. Приводятся необходимые условия при которых это может реализовываться. Сравняются некоторые экспериментальные данные и расчет. Вычисляются акустическое и электромагнитное излучения в результате прохождения нейтринного пучка через земные породы, находящиеся в напряженном состоянии.

Abstract

Sapunov Yu.M. Production of Microcracs by Ionising Radiation in Bodies under Streagth: IHEP Preprint 98-30. – Protvino, 1998. – p. 7, refs.: 14.

Results of charge particles passage through a solid body located under a mechanical load have been presented. On the basis of kinetic theory of strength it is shown, that atoms of recoil, produced in elastic collisions and δ -electrons can generate microcracs. The necessary conditions for this be realized are given. Some experemental and calculationl data are compared. Acoustic and electromagnetic radiation as a result of beam neutrino passage through crustal materials under strenuous condition.

В работе [1,2] показана возможность образования в веществе, находящемся в напряженном состоянии, разрушающей трещины на треках малоэнергетических осколков ядер. Используя теорию Гриффитса, авторы показали, что трещина возникает при энерговыделении $10^9 \div 10^{10}$ эВ/см осколком ядра и относительным отклонением действующего напряжения от предельного напряжения разрушения, равным $\simeq 10^{-8}$. Возникновение такой трещины ведет к разрушению сплошности тела. Однако, как показывают экспериментальные исследования [3,4], задолго до появления такой трещины в процессе деформирования твердого тела (ТТ) в нем образуется множество стабильных микротрещин (МТ), и процесс разрушения неразрывно связан с их массовой генерацией и последующей их эволюцией. При этом трещинообразование происходит практически с момента деформирования тела. А характерный размер МТ определяется структурой материала.

Начальный этап образования МТ обычно связывают с тепловой флуктуацией [4], генерирующей распад механически неустойчивой конфигурации дефектной области материала. Механизм образования МТ в нагруженном теле вследствие появления тепловой флуктуации рассматривается в кинетической теории прочности [3]. В ней сформулированы представления о разрушениях как о кинетическом термофлуктуационном процессе накопления разорванных межатомных связей. В основе этой теории лежат экспериментальные данные по изучению прочности твердых тел в зависимости от времени t действия нагрузки, величины приложенного напряжения σ и температуры T , которые привели С.Н.Журкова к установлению универсальной эмпирической закономерности. В случае одноосного растяжения эта связь аппроксимируется выражением

$$t = t_o \exp((U_o - \gamma\sigma)/\kappa T), \quad (1)$$

где κ — постоянная Больцмана; γ — структурно-чувствительный активационный объем; t_o , U_o — параметры [3].

Дальнейшее развитие представления кинетической теории получили в дилатонной модели [5,6,7]. Эта модель предлагает фононный механизм возникновения крупномасштабных тепловых флуктуаций. Было показано, что при образовании отрицательной плотности (дилатон) в нагруженной цепочке атомов существует

критическая величина деформации ϵ_o , при которой из-за ангармонизма потенциала взаимодействия, энергия в области флуктуации резко возрастает за счет поглощения высокочастотных фононов. Это приводит к тепловому расширению области флуктуации и образованию МТ. Критическое значение локальной деформации среды ϵ_o определяется соотношением [7]

$$\epsilon_o = a(1 - 3G\epsilon)/3G\Lambda, \quad (2)$$

где a — межатомное расстояние; G — термодинамический коэффициент Грюнайна; ϵ — средняя деформация; Λ — длина свободного пробега фононов.

Прохождение заряженных частиц через среду связано с потерей ее энергии на выбивание атомов, ионизацию и возбуждение атомов, расположенных вблизи их траекторий. Образующиеся первично выбитые атомы (ПВА) и δ — электроны с энергией несколько сот электронвольт образуют локальные области с повышенной температурой.

В металлах из-за высокой электронной теплопроводности локальное повышение температуры связывается с ПВА. При их торможении в ТТ они инициируют развитие каскада атом-атомных столкновений, в результате чего повышается температура в этом месте. Говорят, что в этом случае образуется тепловой пик [8]. Релаксация энергии, выделившейся в ТТ при развитии каскада, происходит путем обычной теплопроводности, согласно которой [8] считают, что в области прохождения каскада, создаются мгновенные точечные или цилиндрические тепловые источники с мощностью, равной энергии ПВА. Распространение тепла от источника описывается классическим уравнением теплопроводности с постоянными коэффициентами. В случае точечного источника с энергией E_p температурное поле для изотропной среды имеет вид

$$T = T_o + (E_p/\rho C)/(4\pi D\tau)^{3/2} \exp(-r^2/4D\tau), \quad (3)$$

где T_o — начальное значение температуры; ρ — плотность; C — теплоемкость; D — коэффициент температуропроводности; τ — время; r — расстояние до источника.

Радиальный размер области, в которой достигается максимальное увеличение температуры, и время, за которое это происходит, связаны соотношением $r^2 = 6D\tau$ при поглощении энергии E . Подставив это выражение в уравнение (3), найдем величину максимального изменения температуры в активационном объеме γ :

$$\Delta T = (E_p/\rho C)(3/2\pi e)^{3/2}(4\pi/3\gamma) = 0,308E_p/(\gamma\rho C). \quad (4)$$

Увеличение локальной температуры области каскада приведет к ее тепловому расширению, и, если сумма уже существующей ϵ и тепловой деформации, ϵ_t будет превышать критическую ϵ_o , область каскада будет не излучать (охлаждаясь), а поглощать тепловые фононы. Термоупругая деформация определяется равенством [9]

$$\epsilon_t = \alpha(T - T_o)(1 + \mu)/3(1 - \mu) \quad (5)$$

где α — коэффициент теплового расширения; μ — коэффициент Пуассона.

Пренебрегая в уравнении (2) членом $3G\epsilon$ по сравнению с единицей, запишем условие фоновой накачки и возможной потери локальной прочности или образование МТ в виде

$$a/G\Lambda \leq 3\epsilon + 0,308\alpha E_p(1 + \mu)/(\gamma\rho C)(1 - \mu). \quad (6)$$

Знак равенства в (5) определяет E_m — минимальную энергию ПВА, при которой область возбуждения поглощает фононы и температура растет. Величина локальной температуры, при которой из-за термонапряжений образуется МТ, определяется из уравнения (1). Для этого в качестве напряжения в (1) подставим величину термонапряжения $\Delta\sigma = \alpha K \Delta T$, где K — модуль всестороннего сжатия, и приравняем показатель экспоненты нулю. В результате получаем

$$\Delta T = U_o/(\gamma K \alpha). \quad (7)$$

Подставив данные [3], получим оценку величины увеличения температуры, необходимой для образования МТ. Она оказывается не так велика, порядка $\sim (30 \div 200)^{\circ}C$. Для примера напомним, что в экспериментах [10] по размагничиванию различных сплавов при высокотемпературном облучении было показано, что ПВА создают локальные тепловые области радиусом 263Å с температурой, превышающей температуру Кюри.

Известно, что, проходя через вещество, заряженная частица основную долю энергии отдает электронам и лишь несколько процентов — непосредственно ядрам. В металлах энергия δ -электронов за счет высокой электронной теплопроводности диссипирует в объеме в десятки и сотни раз больше, чем в диэлектриках и полупроводниках. Вследствие этого ионизационные потери заряженных частиц в металлах как правило, не приводят к образованию дефектов. Тогда, как в полупроводниках и диэлектриках, размеры объема поглощения энергии δ -электронов ограничены размером их пробега, составляющего в области энергий несколько сот электронвольт величину $L \sim 10^{-5} \div 10^{-7}$ см. Поэтому в этих веществах по вышеприведенному механизму δ -электроны могут служить местом образования МТ, и вероятность их образования в десятки раз больше, чем в металлах.

Будет ли образованная МТ стабильной, определяется не только поглощенной энергией, но и другими факторами, такими как скорость подвода энергии, напряженность, близость другой стабильной МТ или границы зерна, а также пластичность или хрупкость ТТ. В пластичных материалах эти центры могут вызывать локальную пластическую деформацию и другие радиационно-стимулирующие явления. Хрупкие ТТ более склонны к трещинообразованию.

В работе [11] исследовалось акустическое излучение (АИ) из напряженной зоны металлов (Al, Cu, Pb) при облучении их электронным и протонным пучками. Опыт показал значительное изменение амплитуды АИ (до 90%) в зависимости от напряженного состояния материала. Считая, что ПВА при $\sigma \neq 0$ образуют МТ, оценим отношение добавочной акустической энергии за счет рождения МТ к акустической энергии, генерированной ионизационными потерями за счет термоупругого меха-

низма. АИ, вызываемое ионизационными потерями энергии — $d\epsilon/dx$ заряженной частицы при прохождении слоя вещества x , связано с нестационарным изменением температуры при диссипации этой энергии. В эксперименте [11] $x = 0,05$ см Al и, считая, что $d\epsilon/dx = 2$ МэВ·см²/гр, получаем от каждой проходящей частицы на образование АИ идет $\sim 4,3 \cdot 10^{-14}$ Дж.

При образовании МТ выделяемая энергия определяется произведением вероятности рождения МТ на энергию W , высвобождаемую при разрыве материала

$$W_x = (1 - e^{x/\lambda})W, \quad (8)$$

где $\lambda = A/N\Sigma\rho$; A — атомный номер; N — число Авагадро; Σ — сечение рождения ПВА. При образовании дискообразной МТ длиной L , площадью $\sim L^2$ и раскрытием $\sim 0,1 L$, согласно теории упругости энергия W определяется произведением разгруженного объема $\sim 0,1 L^3$ на плотность упругой энергии $\sim \sigma^2/2E$, где E — модуль Юнга, а $\sigma \simeq 0,1E$ — теоретическая прочность данного материала. В Al при деформации наблюдается образование МТ длиной $L = 2 \cdot 10^{-7}$ м [4].

Для нахождения полного сечения образования ПВА с энергией $E \geq E_m$ от заряженных релятивистских частиц можно использовать решение, найденное Мак-Кинлеем и Фешбахом [8]. В качестве оценки удобно использовать асимптотическое значение сечения для ультрарелятивистских частиц

$$\Sigma = 8\pi a_o Z^2 E_r^2 / (E_m M_n c^2), \quad (9)$$

где $a_o = 0.53\text{Å}$ — радиус Бора; $E_r = 13,6$ эВ — энергия Ридберга; Z, M_n — заряд и масса материала; c — скорость света. Величина E_m определяется из равенства (6). Подставив в (5) данные для Al ($a = 2,9 \cdot 10^{-10}$ м, $G=2$, $\Lambda = 4 \cdot 10^{-8}$ м, $\rho C = 2.43 \cdot 10^6$ Дж м³К⁻¹, $\gamma = 4 \cdot 10^{-27}$ м³, $\alpha = 2,38 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹), получим величину минимальной энергии ПВА, равную $E_m \approx 15$ эВ. Зная E_m , по формуле (8) получаем сечение образования ПВА, равное 66 барн. В итоге, из соотношения (7) получаем, что на каждую частицу, пересекающую пластину, за счет образования МТ приходится $\sim 4,5 \cdot 10^{-14}$ Дж. Эта энергия в металлах идет на пластическую деформацию, в результате которой происходит изменение температуры, вызывающее термоупругую генерацию АИ. Поскольку в рассмотренных случаях механизм образования АИ схож и энергии идущие на эти процессы, примерно равны, то следует ожидать удвоение АИ в случае $\sigma \neq 0$.

В ряде работ (например [1,2,12]) рассматриваются вопросы генерации акустического и электромагнитного импульсов при прохождении нейтринного пучка через земные породы. Рассмотрим возможный сигнал от горной породы, находящейся глубоко под землей при прохождении нейтринного пучка сквозь нее, исходя из предложенного механизма образования МТ, экспериментальных данных по рождению МТ и концентрационного критерия разрушения ТТ [7]. Экспериментальные работы [13,14] показывают, что процесс образования и развития МТ сопровождается электромагнитным и акустическим излучениями.

Как известно, прохождение пучка нейтрино через вещество сопровождается потоком мюонов, образующихся от взаимодействия нейтрино с ядрами. В области энергии мюонов, составляющих десятки и сотни ГэВ, их треки представляют собой прямолинейные отрезки длиной десятки и сотни метров с направлением, мало отличающимся от направления нейтринного пучка. Если деформация среды удовлетворяет условию (2), то на треках мюонов следует ожидать практически одновременное рождение МТ и, соответственно, возбуждение цилиндрического электромагнитного и акустического излучения для длин волн больше, чем расстояние между МТ.

При определении числа возможных МТ на треке заряженной частицы необходимо иметь в виду, что N — предельная концентрация МТ, и их размеры L связаны условием [7] $N^{-1/3}L^{-1} = 3 \div 6$. Средний линейный размер МТ обусловлен гетерогенностью строения вещества и варьируется в широких пределах от $\sim 10^{-7}$ м для пластических материалов до $\sim 10^{-3}$ м для хрупких горных пород. В работе [14] определены размеры, концентрация и энергия электромагнитного излучения при образовании МТ для ряда горных пород, которые имеют значения $(2 \div 8) \cdot 10^{-4}$ м, $4 \cdot 10^7 \div 2,5 \cdot 10^9$ м $^{-3}$ и $10^{-13} \div 3 \cdot 10^{-10}$ Дж соответственно. Время образования МТ было определено в пределах $10^{-7} \div 10^{-5}$ сек. Горные породы в основном состоят из О, Si и Al, для которых сечение образования ПВА с $E_m = 15 \div 30$ эВ составляет $70 \div 30$ барн соответственно. Такие сечения могут обеспечивать возникновение МТ с линейной плотностью $400 \div 200$ м $^{-1}$.

Известно, что в веществе с плотностью ~ 2 гр/см 3 релятивистская частица создает δ -электроны с энергией несколько сот электронвольт с плотностью $\sim 2 \cdot 10^4$ м $^{-1}$, поэтому будем считать, что возможная линейная плотность МТ, возникающая при прохождении релятивистского мюона, изменяется от величины, определяемой сечением рождения ПВА (~ 340 м $^{-1}$) до плотности, ограниченной предельной концентрацией МТ (~ 1300 м $^{-1}$). Предположим, что при образовании МТ вся энергия переходит в цилиндрические электромагнитные и акустические волны. Тогда энергия электромагнитного излучения на расстоянии R составляет $(10^{-7} \div 10^{-10})/R$ Дж/м 2 , а, соответственно, мощность порядка $(10^{-2} \div 10^{-3})/R$ Вт/м 2 . Для трассы с электрическим сопротивлением пород больше $\sim (10^5 \div 10^6)$ Ом·м возможна регистрация электромагнитного излучения на расстоянии несколько десятков километров.

Энергию цилиндрического АИ оценим полагая, что породы хрупкие и вся энергия образования МТ переходит в АИ. Считая, модуль Юнга для породы $\sim 2,6 \cdot 10^5$ кг/см 2 , находим, что энергия АИ составляет $(0,13 \div 2,3)/R$ Дж/м 2 .

Полученные данные показывают, что выделенная энергия в виде АИ и электромагнитного излучения на несколько порядков превышает ионизационные потери проходящего мюона. Это связано с тем обстоятельством, что находящееся под нагрузкой деформируемое ТТ рассматривается как неравновесная термодинамическая система. При образовании МТ, которое инициирует мюон, структура переходит в равновесное состояние с выделением энергии за счет уменьшения механических напряжений.

Приведенные оценки указывают на возможность по АИ или электромагнитному излучению регистрировать нейтринный пучок с одиночными равновесными мюонами при прохождении его через среду в напряженном состоянии. В случае ее реализации это оказалось бы ценным методом для геофизических исследований напряженных зон Земли.

Автор выражает благодарность В.А.Цареву (ФИАН) за полезные обсуждения и советы.

Список литературы

- [1] Хаврошкин О.Б., Царев В.А., Цыплаков В.В., Чечин В.А. – Препринт № 67 ФИАН, Москва, 1985.
- [2] Хаврошкин О.Б., Царев В.А., Цыплаков В.В., Чечин В.А. // Краткие сообщения по физике. ФИАН, 1985. /num 10, с.26.
- [3] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М., Наука, 1974.
- [4] Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. — М.: Металлургия, 1984.
- [5] Кусов А.А. // ФТТ. 1979, т.21, в.10, с.3095-3099
Кусов А.А., Веттегрень В.И.// ФТТ. 1980, т.22, в.11, с.3350-3358.
- [6] Журков С.Н. // ФТТ. 1983 т.25, в.10, с.3119-3123.
- [7] Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. — Политехника, С.-Петербург, 1993.
- [8] Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. — М.: Мир, 1971.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965.
- [10] Kähkönen O.P., Kautto E., Manninen M. // J.Appl.Phys. 1992, v.72, № 5, p.2075-2076.
- [11] Воловик В.Д., Иванов С.И. // Физика металлов и металловедение. 1977, т.43, в.5, с.943.
- [12] Царев В.А., Чечин В.А. // ЭЧАЯ. 1986, т.17, с.389.

[13] Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. // Изв. АНСССР, сер. физика Земли, 1977, № 6, с.11-18.

[14] Иванов В.В., Пимонов А.Г., Егоров П.В., Колпакова Л.А. // Изв. АНСССР, сер. физика Земли, 1990, № 7, с.78-84.

Рукопись поступила 27 апреля 1998 г.

Ю.М. Сапунов.

Механизм образования микротрещин ионизирующим излучением в нагруженных телах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 14.05.98. Формат $60 \times 84/8$.

Офсетная печать. Печ.л. 0,87. Уч.-изд.л. 0,67. Тираж 150. Заказ 168.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

