

# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

---

---

## НАНОСЕКУНДНАЯ ДИНАМИКА РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ОГНЕСТОЙКОГО КОМПОЗИТА ПРИ УДАРЕ И ТРЕНИИ

**В.И. Веттегрень, доктор физико-математических наук, профессор;**

**А.И. Ляшков, кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник;**

**И.П. Щербаков, кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник.**

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук**

С наносекундным разрешением методами флуоресцентной спектроскопии и акустической эмиссии изучена динамика разрушения при ударе и трении полимерного огнестойкого композита с матрицей из полифениленсульфида, армированной углеродной тканью. Установлено, что микротрещины образуются в моменты в узлах ударной волны, пробегающей по образцу. Образование микротрещин включает в себя несколько последовательных стадий: разрывы угольных волокон за время меньше 10 нс, нитей из них – за ~ 4 мкс и углеродной ткани – за 15–20 мкс.

*Ключевые слова:* огнестойкий композит, разрушение с наносекундным разрешением

## DAMAGE DYNAMIC OF POLYMER FIRE RESISTANCE COMPOSITE AT IMPACT AND FRICTION WITH NANOSUND RESOLUTION

V.I. Vettegren; A.I. Lyachkov; I.P. Shcherbakov.

Physico-technical institute named after A.F. Ioffe of the Russian academy of sciences

Dynamics of impact damage and friction of fire-resistant polymer composite matrix from polyphenylene sulfide reinforced by carbon fabric was studying by nanosecond resolution fluorescence spectroscopy and acoustic emission study It was found that microcracks are formed in moments at the nodes of a shock wave running through the sample. Crazeing includes several following stages: carbon fiber breaks during less than 10 ns, the filaments of them doing for about 4  $\mu$ s and carbon fabric during about 15–20  $\mu$ s.

*Keywords:* fire-resistant polymer composite, fracture with nanosecond resolution

Для создания специальной защитной одежды, рукавов и тросов, используемых при повышенных тепловых воздействиях и открытого пламени, в настоящее время применяют термостойкие композиционные материалы. В процессе эксплуатации эти изделия подвергаются ударам и трению, которые приводят к их преждевременному износу

и разрушению. До последнего времени в литературе отсутствовали сведения о возможности контроля и исследования разрушения непосредственно во время удара и в процессе трения.

Недавно были выполнены работы [1–3], в которых для решения этой задачи был использован метод люминесценции, позволяющий следить за процессом разрушения с наносекундным временным разрешением. В данной работе дан краткий обзор полученных результатов. В качестве объекта исследования был выбран композит с матрицей из полифениленсульфида (ПФС), армированной угольной тканью. Изделия из ПФС могут работать в интервале от  $-60$  до  $+220$  °С и выдерживать кратковременный нагрев до  $260$ – $270$  °С. Уникальным свойством ПФС является огнестойкость (категория ПВ-0). При наполнении ПФС угольным волокном получают композит с высокими значениями прочности, износостойкости и огнестойкости.

Модельные образцы имели вид пластинок из ПФС и композита с матрицей из ПФС, армированной угольной тканью. Для проведения исследований были изготовлены уникальные установки, позволяющие измерять спектры люминесценции, акустической и электромагнитной эмиссии с временным разрешением  $10$  нс.

На рис. 1 показан спектр люминесценции композита. Его анализ показал, что излучение возникает при релаксации электронного возбуждения свободных радикалов, которые образовались при разрывах углерод–углеродных связей в угольном волокне (полосы  $2,13$ ,  $2,32$  и  $2,73$  эВ) и между атомами углерода и серы в молекуле ПФС (полоса  $3,03$  эВ).

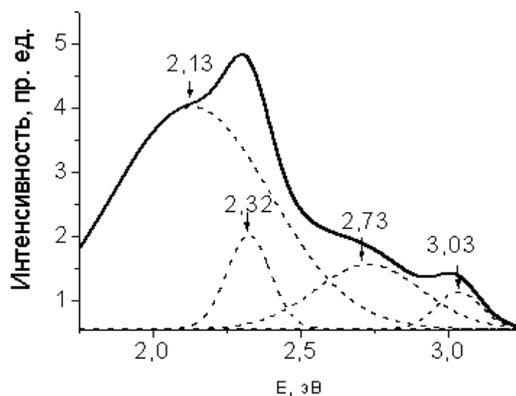


Рис. 1. Спектр люминесценции композита

Типичные временные деформации поверхности и интенсивности люминесценции после удара по поверхности образца стальным бойком показаны на рис. 2.

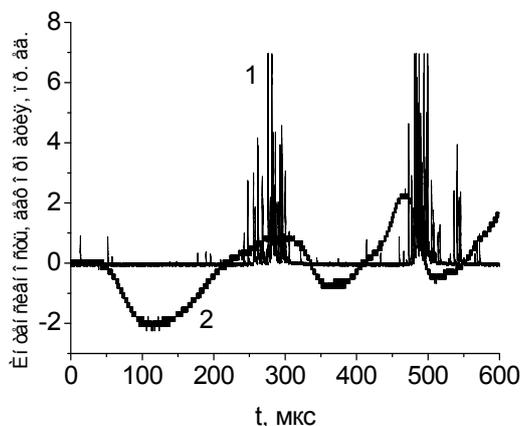


Рис. 2. Фрагмент временных зависимостей люминесценции и деформации поверхности (2) композита после удара стальным бойком

Они объясняются следующим образом. Волна сжатия, возникающая после удара бойком, вызывает появление волн деформации, которые, достигнув границ образца, отражаются и бегут обратно. Волны порождают разрывы химических связей в волокне и матрице, которые приводят к образованию микротрещин в поверхностном слое образца толщиной  $\sim 100$  нм. Рождение каждой микротрещины сопровождается вспышкой люминесценции, интенсивность которой пропорциональна размеру микротрещин. Это позволило оценить размеры микротрещин – от  $\sim 0,3$  до  $\sim 10$  мкм.

Пример временной зависимости интенсивности вспышек люминесценции при трении композита о стальной ролик показан на рис. 3 (для случая, когда слои угольной ткани направлены перпендикулярно плоскости скольжения, расстояние между слоями – 400 мкм).

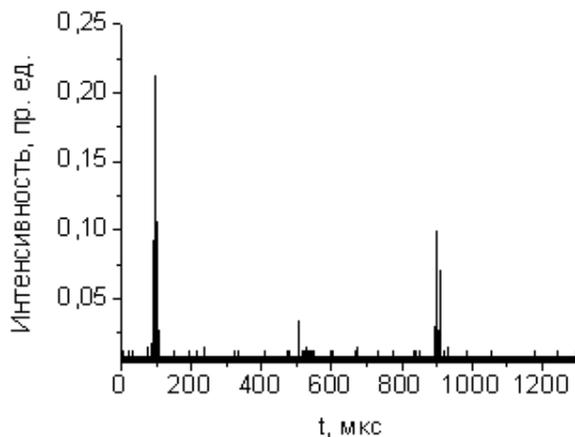


Рис. 3. Фрагмент временной зависимости интенсивности вспышек люминесценции

В этом случае наблюдаются 2 серии вспышек, разделенные временным интервалом  $\sim 800$  мкс, величина которого задана временем пробега волны деформации между слоями угольной ткани (измеренная скорость пробега волны – 4 км/с). Чтобы создать зародыш трещины в угольной ткани необходимо разорвать  $\sim 4$  нити. Поэтому каждая серия состоит из 4–5 вспышек (рис. 4 а). Временной интервал между ними составляет  $\sim 4$  мкс и складывается из времени для разрыва нити –  $\sim 10$  нс и передачи напряжения от одной нити к другой – 390 мкс. Каждая нить состоит из 30 волокон диаметром  $\sim 3$  мкм. Поэтому каждая вспышка состоит из 30 сильно наложенных друг на друга вспышек, соответствующих разрыву одного волокна (рис. 4 б).

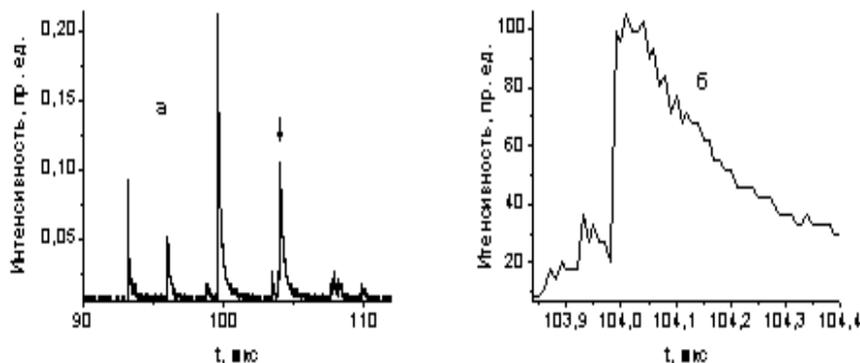


Рис. 4. а – первая из серий вспышек, показанных на рис. 3, б – вид одной из вспышек (показана стрелкой на рис. 4 а)

#### Выводы:

1. При ударе по поверхности стальным бойком и трении термостойкого, огнестойкого композита о стальной шарик в нем образуются волны деформации, которые вызывают разрывы химических связей и образование микротрещин.

2. Построенные в лаборатории физики прочности Физико-технического института Российской академии наук установки позволяют проследить за динамикой волн деформации и образованием микротрещин в полимерном композите непосредственно во время удара и трения.

#### Литература

1. Фрактolumинесценция кристаллического кварца при ударе / В.И. Веттегрень [и др.] // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 1. С. 29–31.

2. Трибolumинесценция полимеров и композитов / В.И. Веттегрень [и др.] // Вопросы материаловедения. 2009. Т. 57. № 1. С. 141–145.

3. Веттегрень В.И., Ляшков А.И., Щербаков И.П. Фрактolumинесценция полифениленсульфида и волокнистого композита на его основе // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 155–158.