

**ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ,
ВОЗНИКАЮЩЕЕ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ
И РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ**

К. Б. Абрамова, А. Б. Пахомов, Б. П. Перегуд, И. П. Щербаков

Приводятся результаты исследования инфракрасного излучения поверхности разрушаемого или деформируемого металла при различных режимах нагружения. Сопоставляются временные зависимости интенсивностей ИК и видимого излучения при ударном нагружении меди, титана, стали. Приводятся данные об области локализации источников свечения и измеренные значения радиационных температур.

Разрушение и необратимое деформирование твердых веществ сопровождается преобразованием механической работы в другие виды энергии — тепловую, электромагнитную, поверхностную, энергию упругих колебаний и т. д. Например, при разрушении металлов выделяется в основном в виде тепла энергия до 10^8 эрг на квадратный сантиметр образующейся поверхности [1]. Соответствующий нагрев материала в зоне разрушения приводит к увеличению мощности электромагнитного излучения. Вместе с тем исследования [2-7] показали, что деформация и разрушение металлов сопровождаются световым излучением в видимом диапазоне длин волн, происхождение которого не связано с разогревом образцов. При разрушении стали маятниковым копром интенсивность свечения увеличивается с уменьшением ударной вязкости и, следовательно, тепловыделения. В спектре излучения присутствуют линии атомов железа, которые, вероятно, эмитируются растущей трещиной [6].

Излучение при быстро ($v=200$ м/с) разрушении медных образцов имеет спектр, отличный от теплового [2]. Это явление получило название «механолюминесценции». В работе [8] показано, что спектр механолюминесценции благородных металлов может быть объяснен межзонными переходами под уровнем Ферми в результате локальной деформации электронной зонной структуры.

Настоящая работа посвящена исследованию инфракрасного излучения поверхности разрушаемого или деформируемого металла при различных режимах нагружения. Приводятся данные об области локализации источников ИК свечения; сопоставляются временные зависимости интенсивностей ИК и видимого излучения при ударном нагружении меди, титана, стали.

Для регистрации импульсов излучения в различных спектральных диапазонах применялись приемники ФЭУ-136 в счетном режиме, чувствительный в области $0.3 < \lambda < 0.8$ мкм, ФЭУ-28 в аналоговом режиме ($0.4 < \lambda < 1.2$ мкм), фотосопротивление ФСГ-22-3А1 ($1 < \lambda < 10$ мкм). Фотосопротивление было специально отградуировано для определения радиационной температуры в области разрушения (деформации) образцов. Изображения в собственном инфракрасном излучении были получены с помощью камеры инфравидения АГА-750. Камера чувствительна в диапазоне длин волн 2—5 мкм, время кадровой развертки телевизионного изображения 200 мс; изображение формируется четырьмя четвертькадровыми развертками; максимальная чувствительность по отношению к изменению температуры 0.2° .

Ударное нагружение цилиндрических металлических образцов осуществлялось маятниковым копром МК-30. Приемник (или приемники) электромагнитного излучения располагался напротив образца, вблизи касательной к траектории маятника в точке удара. При одновременной регистрации излучения в трех различных спектральных диапазонах (рис. 1) было обнаружено, что свечение в видимом диапазоне происходит в течение времени развития трещины, после чего в основном прекращается. Напротив, инфракрасное излучение с $\lambda > 0.8$ мкм резко нарастает при доломе и продолжается после окончания процесса разрушения. Такая кинетика и время релаксации ИК свечения говорят в пользу его теплового происхождения (кинетика релаксации температуры в железе вблизи трещины после разрушения показана в работе [1]).

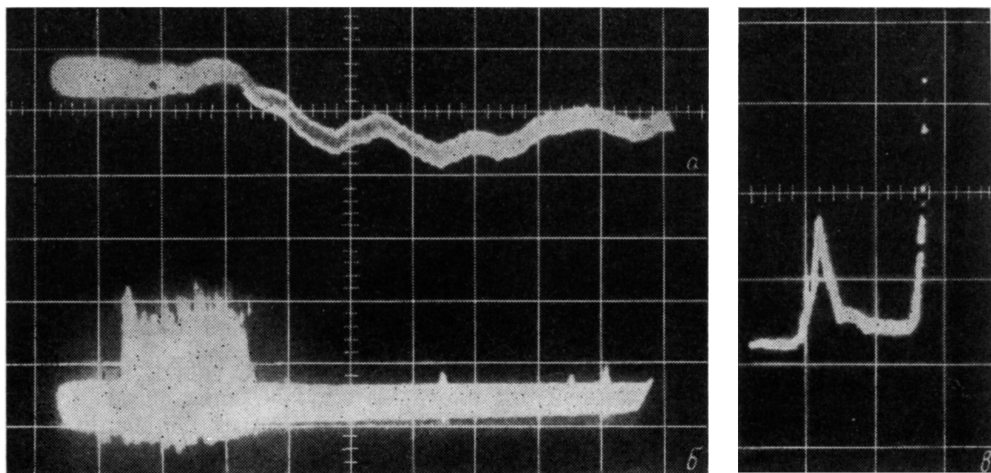


Рис. 1. Осциллограммы сигналов ФЭУ (а), ФЭУ-136 ($T_{\text{ФЭУ}} = -20^\circ\text{C}$) (б), ФЭУ-28 (в) при разрушении образца из сплава ВТ-8 со скоростью $v=5$ м/с. Развертка — 200 мкс/дел.

на рис. 4). Температура в области разрушения, определявшаяся по амплитуде сигнала ФЭУ, может достигать значительной величины: для $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ для сплава ВТ-8 и 100°C для стали У-8. Для меди измерить температуру при разрушении таким способом не удалось. Последнее связано с несколькими причинами. Во-первых, из-за большой вязкости медного образца его трудно разрушить ударным изгибом; во-вторых, для меди малы время релаксации температуры и излучательная способность в ИК диапазоне длин волн. Если вспышку инфракрасного света связать с появлением после разрушения в поле видимости приемника сильно пластически продеформированной и поэтому наиболее горячей области образца, по которой наносится удар маятниковым копром, тогда то, что вспышки излучения в двух спектральных диапазонах разделены во времени (рис. 1), говорит в пользу нетеплового (люминесцентного) характера свечения в области длин волн $0.3\text{--}0.8$ мкм. Это справедливо по крайней мере по отношению к излучению, совпадающему по времени с процессом макроскопического разрушения.

Рис. 2 дает представление о распределении температуры на поверхности деформируемых образцов. На этом рисунке приведены фотографии экрана дисплея камеры АГА-750, наблюдающей деформацию копром медного (а) и титанового (б) цилиндров $\varnothing 18$ мм. Сила удара подбиралась таким образом, чтобы образец не разрушался полностью, иначе быстрое действие камеры было бы недостаточно для получения изображения. При деформации меди максимальная температура поверхности, оцененная по контрастности изображения, превышает комнатную на 2° , при деформации титана — на 20° (эта оценка может оказаться несколько заниженной из-за недостаточного быстрого действия прибора). Свежеобразованная поверхность медного образца (рис. 2, а) в трещине темнее, чем окисленная, из-за разницы величин излучательной способности.

С помощью камеры АГА-750 и фотоспротивления наблюдалось ИК излучение с поверхности металлических образцов при малых скоростях нагружения. Образцы из титановой (BT1-0), медной и стальной (4Х13) фольг толщиной 0.1 мм и шириной в самом узком месте 10 мм растягивались с помощью рычажного механизма. Нагрузка возрастала от 0 до разрушающей F_p ступенчато

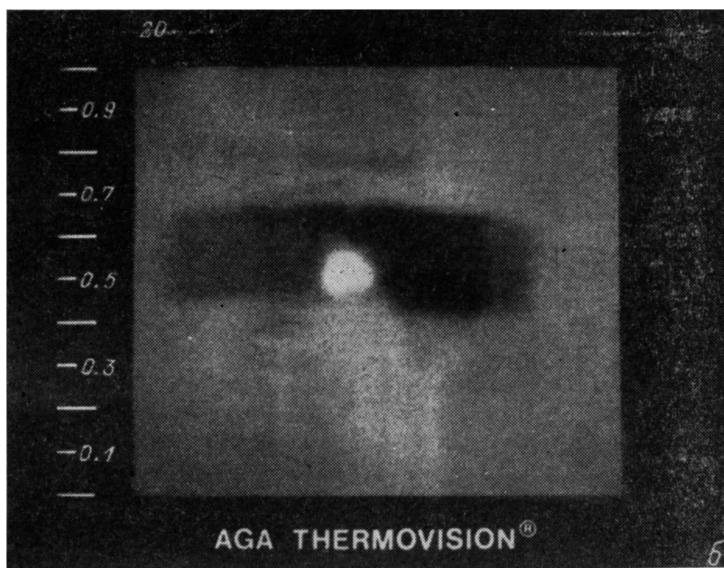
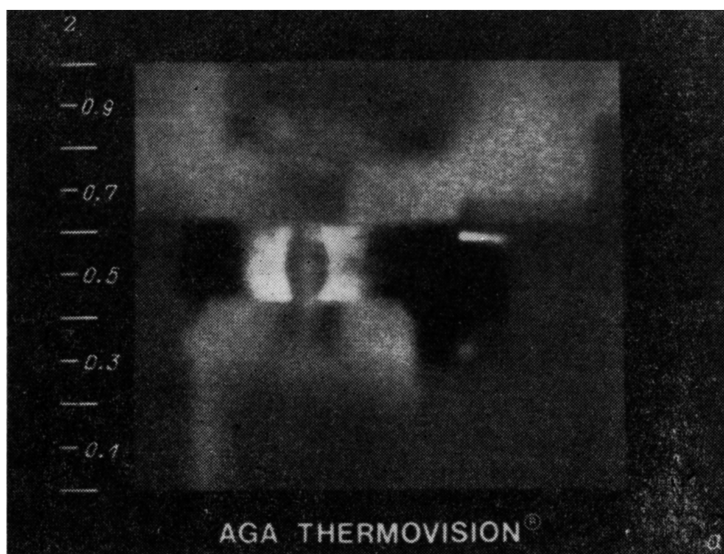


Рис. 2. Вспышка инфракрасного излучения при динамической деформации медного (а) и титанового (б) образцов.

во времени. Как правило, в процессе нагружения образцов при нагрузках в интервале $(0.6-1.0) F_p$ можно было наблюдать 1—3 кратковременные (длительностью 0.01—0.2 с) вспышки ИК излучения (рис. 3). Они, вероятно, связаны со «вспышками» локальной необратимой деформации при накоплении микронарушений, например, типа описанных в [9] или при активизации дислокационных источников. Разрушение также сопровождается ИК излучением. На рис. 4, а видна «светящаяся» область титанового образца, нагруженного силой $F=0.75F_p$; на рис. 4, б тот же образец непосредственно после разрушения. По интенсивности свечения с помощью ФСГ были оценены скачки тем-

пературы при локальной необратимой деформации: титан — 34° , сталь — 32° , медь — 25° и при разрушении соответственно 52, 44 и 40° . Полученные зна-

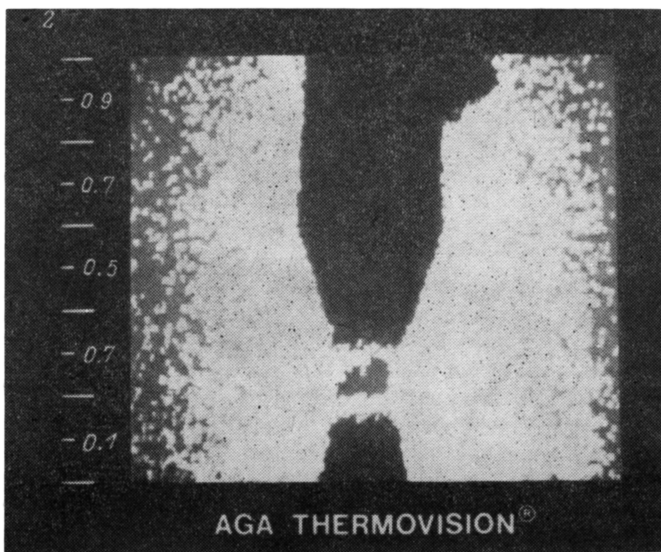


Рис. 3. ИК излучение образца из фольги Ti, растягиваемого квазистатически. Фотография экрана дисплея камеры AGA-750, изотермические области декорированы белыми точками.

чения близки к результатам прямого измерения температуры при разрушении железа, приведенным в [1].

Наиболее интересными из описанных результатов нам представляются следующие.

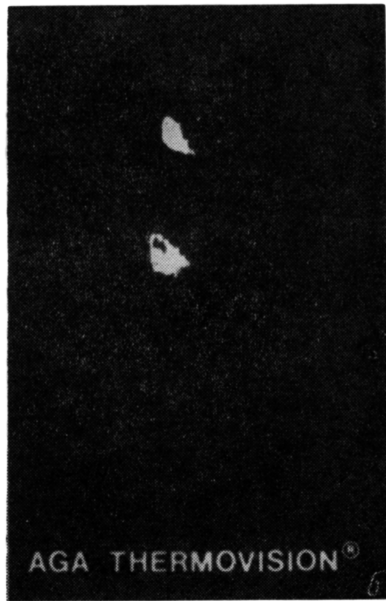
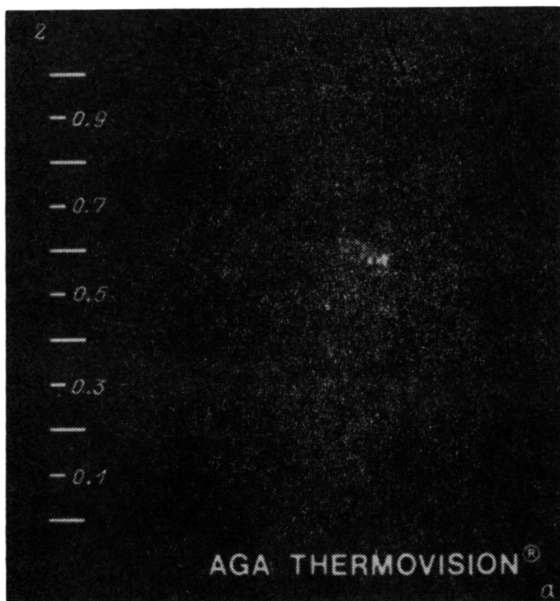


Рис. 4. Растягиваемый квазистатически образец (сплав BT-1-0), видна только область локального разогрева (а) и тот же образец непосредственно после разрушения (б).

1. Разрушение и деформация металлов сопровождаются ИК излучением и излучением в видимом диапазоне; два типа свечения возникают на разных стадиях процесса разрушения и имеют различные механизмы возбуждения.

2. ИК свечение предположительно связано с разогревом металла в процессе накопления микронарушений или при локальной пластической деформации.

3. При динамическом нагружении локальный разогрев в наиболее интенсивно деформируемой области для некоторых металлов может достигать сотен градусов.

Литература

- [1] Schönert K., Weichert R. Chem. Ing. Techn., 1969, v. 41, S. 295—300.
- [2] Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Златин Н. А. и др. ЖЭТФ, 1976, т. 71, № 11, с. 1873—1876.
- [3] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П. и др. Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, № 13, с. 769—772.
- [4] Тупик А. А., Валуев Н. П., Манегин Ю. В. ДАН СССР, 1983, т. 272, № 4, с. 858—861.
- [5] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 16, с. 997—999.
- [6] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. ЖТФ, 1986, т. 56, № 5, с. 978—981.
- [7] Тупик А. А., Валуев Н. П., Беленький А. Я. Физ. хим. мех. матер., 1985, т. 21, № 4, с. 51—56.
- [8] Молоцкий М. И. ФММ, 1983, т. 55, № 1, с. 43—50.
- [9] Журков С. Н. ФТТ, 1983, т. 25, № 10, с. 3119—3123.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
14 июля 1986 г.