

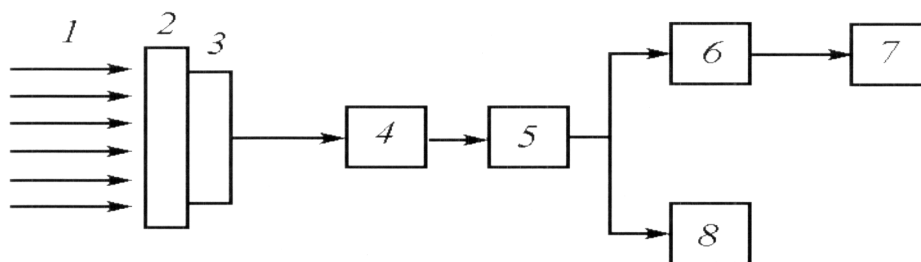
## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ РЕНТГЕНОВСКИМИ ЛУЧАМИ

*Б.М. Лапшин, А.П. Мамонтов, С.Я. Рябчиков, Б.В. Чахлов  
Томск, Россия*

*Исследована акустическая эмиссия при облучении рентгеновскими лучами твердых сплавов. Рассмотрены физические процессы возникновения сигналов акустической эмиссии в процессе облучения. Разработан метод радиационно-акустического контроля твердосплавного инструмента для бурения горных пород.*

Металлы и сплавы находятся в состояниях, весьма далеких от состояния термодинамического равновесия, достижению которого препятствуют энергетические параметры дефектных и примесных перестроек. При облучении рентгеновскими лучами, гамма-квантами, электронами появляются состояния, маловероятные с позиций равновесной термодинамики. Возникновение этих состояний сопровождается появлением акустических волн, параметры которых зависят от состояния исходной структуры материала. В связи с этим для контроля качества и диагностики металлов и сплавов перспективным является метод акустической эмиссии, генерируемой в процессе их облучения рентгеновскими лучами.

Для регистрации сигналов акустической эмиссии, возникающей в металлах и сплавах при различных воздействиях на них, разработана и изготовлена установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. Также разработаны метод и методика изучения сигналов акустической эмиссии при облучении металлов и сплавов рентгеновскими лучами.



*Рис. 1. Блок-схема установки для измерения акустической эмиссии, возникающей в материалах при облучении: 1 – рентгеновские лучи; 2 – исследуемый образец; 3 – пьезоэлектрический датчик; 4 – предварительный усилитель; 5 – основной усилитель; 6 – многоканальный анализатор импульсов; 7 – счетчик импульсов; 8 – осциллограф*

Упругие волны, возникающие в образце, распространяются к его поверхности. При облучении рентгеновскими лучами сигналы акустической эмиссии проявляются в виде колебаний поверхности материала и принимаются пьезоэлектрическим датчиком, преобразующим механические колебания в электрические. Электрические сигналы после прохождения блока предварительного усиления поступают через селективный основной усилитель на осциллограф, многоканальный анализатор импульсов и счетчик импульсов.

Сигналы акустической эмиссии измерялись в процессе облучения рентгеновскими лучами. Предварительный усилитель выполнен на базе микросхемы типа К284УД1. Её достоинства заключаются в высоком входном сопротивлении, низком уровне шумов при работе с высокоомным датчиком и возможностью масштабного регулирования коэффициента усиления в полосе пропускания. Верхняя и нижняя частоты пропускания сигналов задаются внешними элементами. Уровень собственных шумов используемого предварительного усилителя не превышал 10 мкВ. В качестве основного селективного

усилителя применяется прибор марки SMV-11, с помощью которого можно регулировать частоту исследуемого сигнала от 0,01 до 20 МГц (при ширине пропускания 9 кГц). Усиленные сигналы регистрировались электронно-счетным частотомером типа ЧЗ-33.

В зависимости от направления колебаний частиц относительно образца измеряемого материала возникает несколько типов волн. Если частицы материала колеблются вдоль образца, то в нем возникают и распространяются деформации сжатия-растяжения и появляется продольная волна. Если же частицы колеблются перпендикулярно образцу, то возникают и распространяются деформации сдвига и появляются поперечные и сдвиговые волны. Продольные волны возникают во всех средах, тогда как поперечные волны – только в твердых телах, обладающих сдвиговой упругостью.

Скорость распространения продольной  $C_1$  и поперечной  $C_2$  волн зависит от модуля продольной деформации  $E$  (модуль Юнга) и коэффициента продольного сжатия  $V_p$  (коэффициент Пуассона).

Возникающая в материале бегущая волна ослабляется с расстоянием вследствие её затухания. Зависимость ослабления в случае плоской волны с начальной амплитудой  $A_0$ , происходящей на расстоянии  $r$ , выражается формулой

$$A = A_0 \exp(-kr),$$

где  $k$  – коэффициент затухания, который определяется величиной коэффициента поглощения  $k_n$  и коэффициента рассеяния  $k_p$ , т. е.  $k = k_n + k_p$ .

Вследствие эффектов внутреннего трения, не идеальных упругих свойств материала и других факторов звуковая энергия при поглощении превращается в тепловую. При рассеянии на несовершенствах материала звуковая энергия уходит в стороны от направления распространения волн.

Энергия звуковых колебаний регистрировалась преобразователем, в качестве которого использовался датчик из пьезокерамики типа ЦТС-19 в виде диска (поляризованного по толщине) диаметром  $d = 20$  мм и толщиной  $h = 5$  мм. Частота основного резонанса  $f_{рез}$  для продольных колебаний ненагруженного диска определялась из соотношения

$$f_{рез} = \frac{h}{2} \left( \frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

где  $\rho$  – плотность пьезокерамики;

$h$  – толщина пьезоэлектрического образца.

Проводились измерения акустической эмиссии в процессе облучения рентгеновскими лучами вольфрама, твердых сплавов ВК8 и Т15К6, применяемых для изготовления коронок и долот для бурения горных пород. Исследовалась акустическая эмиссия, возникающая при облучении базовых образцов (без обработки) и образцов, обработанных в жидком азоте в следующем режиме: исходная температура  $T_{исх} = 20^\circ\text{C}$ , время криогенной обработки (в жидком азоте)  $t_{обр} = 20$  мин. После криогенной обработки как базовые образцы, так и обработанные в жидком азоте помещались в установку для измерения сигналов акустической эмиссии, где их облучали с помощью рентгеновской установки типа РУП-150-10. Результаты измерения акустической эмиссии базовых образцов (кривая 1) и образцов, обработанных в жидком азоте (кривая 2), приведены на рис. 2.

Кривые, характеризующие зависимость количества импульсов акустической эмиссии от времени облучения рентгеновскими лучами твердого сплава, отличаются двумя пиками акустической эмиссии в обоих случаях. Это свидетельствует о том, что в твердом сплаве имеются как точечные (первый пик), так и линейные (второй пик) дефекты. Первый пик для обоих образцов занимает одно и то же положение, тогда как второй пик у образцов, прошедших криогенную обработку, смещается в область меньшего времени облучения.

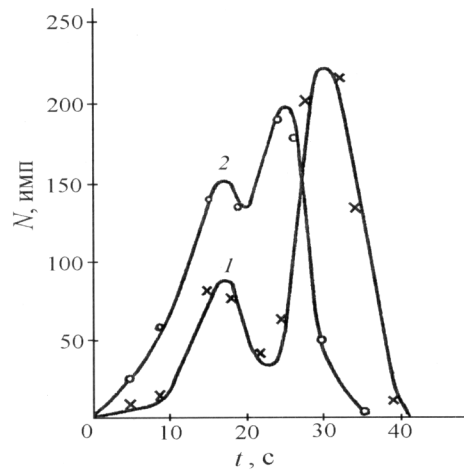


Рис. 2. Зависимость количества импульсов акустической эмиссии от времени облучения рентгеновскими лучами твердого сплава: 1 – базовый образец; 2 – образец, обработанный жидким азотом в режиме:  $T_{исх} = 20^{\circ}C$ ,  $t_{обр} = 20$  мин

Это объясняется тем, что при криогенной обработке твердого сплава происходят структурно-фазовые превращения за счет термического воздействия на дефекты.

Положение и форма кривых акустической эмиссии, полученные при различных режимах криогенной обработки, позволяют судить о характере происходящих процессов. Так, положение пиков акустической эмиссии не зависит от режимов криогенной обработки (рис. 3).

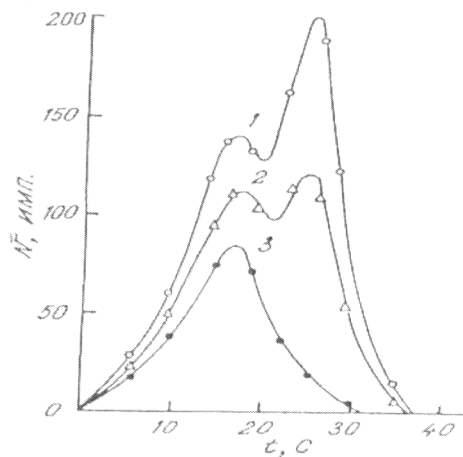


Рис. 3. Зависимость количества импульсов акустической эмиссии от времени облучения рентгеновскими лучами образцов твердого сплава, обработанных в жидком азоте в режимах:

$$1 - T_{исх} = 20^{\circ}C, t_{обр} = 15 \text{ мин}; 2 - T_{обр} = 100^{\circ}C, t_{обр} = 15 \text{ мин}; 3 - T_{исх} = 20^{\circ}C, t_{обр} - \text{многократная обработка}$$

Однако количество наблюдаемых импульсов для различных режимов существенно отличается. При более жестком режиме (многократное погружение образцов в жидкий азот) фиксируется меньшее количество импульсов акустической эмиссии, так как при жестком режиме криогенной обработки вводится большая концентрация точечных и линейных дефектов, на которых рассеиваются акустические волны, и поэтому они не достигают пьезоэлектрического датчика.

Результаты исследований акустической эмиссии полностью согласуются с данными по исследованию прочностных характеристик твердых сплавов ВК8 и Т15К6, обработанных в жидком азоте. Проводились измерения разрушающей нагрузки, предела прочности при изгибе, деформации, жесткости, твердости по Роквеллу, микротвердости. Полученные данные представлены в таблице. Здесь же приведены данные по количеству импульсов акустической эмиссии.

Количество импульсов акустической эмиссии	Разрушающая нагрузка, Р, кГс	Предел прочности при изгибе, кГс/см	Деформация, мм	Жесткость, кГс/мм	Твердость по Роквеллу, Н	Микротвердость, кГс/мм <sup>2</sup>
1576	443	9843	0,058	7637	86,2	1290
797	426	9493	0,047	9200	89,8	1526
245	392	8756	0,042	9350	90,2	1634

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что имеется прямая корреляция количества импульсов акустической эмиссии с прочностными характеристиками твердого сплава. Кроме того, установлена прямая корреляция количества импульсов акустической эмиссии с проходкой на коронку и механической скоростью бурения скважин твердосплавным инструментом.

Генерация акустических волн при облучении рентгеновскими лучами обусловлена тем, что в процессе облучения таких неравновесных материалов, какими являются металлы и сплавы, происходит аннигиляция междоузельных атомов с генетически связанными вакансиями. В области аннигиляции дефектов возникает тепловая вспышка (рис. 4) в результате освобождения запасенной в кристаллической решетке энергии, которая составляет величину порядка  $10 \text{ эВ}$  [1].

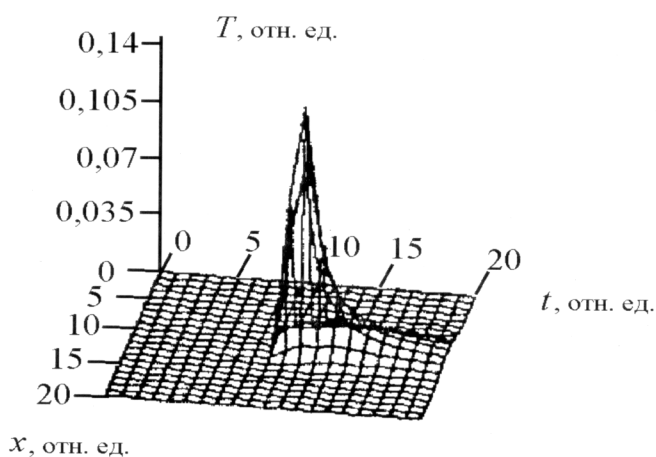


Рис. 4. Распределение температуры  $T$  в твердом сплаве во времени  $t$  и пространстве  $x$ , обусловленное аннигиляцией междоузельного атома с генетически связанной вакансией в процессе облучения рентгеновскими лучами

Освобождение запасенной энергии приводит к резкому возрастанию температуры в ограниченном объеме, затем температура практически мгновенно уменьшается до температуры окружающей область аннигиляции дефекта среды. Температура в области аннигиляции дефектов, как показывают расчеты, превышает  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  [2].

В результате происходящих процессов возникает импульс давления, вызывающий акустическую волну, которая при распространении в металлах и сплавах рассеивается на точечных и линейных дефектах. Количество импульсов акустической эмиссии определяется концентрацией имеющихся в материале дефектов. В более совершенном по структуре материале имеется меньше центров, рассеивающих акустические волны, и в связи с этим регистрируется большее количество импульсов акустической эмиссии. Наиболее интенсивно протекает этот процесс в областях, окружающих дислокации, и на границах зерен, что приводит к уменьшению размеров и количества дислокаций, а также к понижению температуры фазового перехода. Области аннигиляции дефектов в этом случае являются точками бифуркаций, определяющими самоорганизацию металлов и сплавов при облучении рентгеновскими лучами [3].

Импульсы акустической эмиссии наблюдаются лишь в течение 30 с, поскольку в процессе облучения изменяется сам характер взаимодействия рентгеновского излучения с материалом. Наиболее вероятной причиной этого является возникающая интерференция рентгеновских волн с акустическими волнами.

Применение облучения рентгеновскими лучами с одновременной регистрацией акустических волн позволяет эффективно прогнозировать ресурс и поведение металлов и сплавов при различных видах обработки.

Полученные результаты по контролю качества и диагностике твердых сплавов позволили разработать радиационный технологический процесс повышения работоспособности твердосплавного и алмазного инструмента для бурения горных пород.

Проводили облучение твердосплавных и алмазных коронок в реакторном пространстве остановленного промышленного уран–графитового реактора. Мощность дозы излучения составляла 0,15–0,18  $\frac{P}{c}$ . Также проводили облучение коронок в установке «Исследователь» при мощности дозы излучения 250–280  $\frac{P}{c}$ . Установлено, что независимо от мощности дозы облучение приводит к эффективному повышению проходки на коронку и механической скорости бурения скважин твердосплавным и алмазным инструментом для бурения горных пород.

Облучение металлов и сплавов ионизирующим излучением позволяет не только проводить их диагностику, но и улучшать качество металлорежущего, бурового и волоочильного инструмента. Установлено, что улучшение качества инструмента происходит независимо от мощности дозы излучения, а определяется только дозой излучения.

Так, облучение  $\gamma$ -квантами при мощности дозы 300, 150, 10, 5 и 0,15  $\frac{P}{c}$  дозой  $10^4 - 10^5 P$  позволяет улучшать качество металлов и сплавов независимо от мощности дозы излучения.

Большой интерес представляет повышение качества твердосплавного и алмазного инструмента для бурения горных пород. В твердом сплаве, применяемом для изготовления твердосплавного и алмазного инструмента, области дефектов сосредоточены на границе раздела  $WC - Co$ . В твердом сплаве с вкрапленными зёрнами алмаза в матрицу, представляющую собой твердый сплав типа ВК8, области дефектов расположены на границе зерно алмаза – твердый сплав. В процессе облучения происходит движение дислокаций, которые занимают наиболее выгодные в энергетическом отношении положения.

Поскольку максимальное количество дислокаций расположено на границе раздела алмазное зерно – твердый сплав, то перестройка дислокаций приводит к устранению пор в этой области и закреплению зерен алмаза в твердосплавной матрице. Кроме того, освобожденные междоузельные атомы кобальтовой связки твердого сплава диффунди-

руют к зернам алмаза за счет колоссального увеличения коэффициента диффузии кобальта, что также способствует закреплению зерен алмаза в твердосплавной матрице. Все это приводит к повышению абразивной стойкости алмазного породоразрушающего инструмента. Так, при одной и той же проходке скважин в одинаковых условиях в необлученных коронках было потеряно 82 алмазных зерна, тогда как в облученных коронках было потеряно 43 алмазных зерна.

Анализ твердого сплава масс-спектрометрическим методом показал, что после облучения  $\gamma$  – квантами появляется новая фаза  $Co_xW_yC$ , которая отсутствует при анализе исходных образцов. Появление новой фазы и изменение дефектности материала изменяет и характер излома твердого сплава. Это подтверждено при изучении поверхности разрушения твердого сплава методом реплик на просвечивающем электронном микроскопе с разрешением 20 Å. Облучение твердого сплава существенно изменяет характер излома: во-первых, поры вдоль ребер спайности исчезают и уменьшается их количество на границе  $WC - Co$ ; во-вторых, на поверхности карбида вольфрама появляются элементы вязкого излома – гребни отрыва, ручьистый узор; в-третьих, уменьшается вытяжка кобальтовой связки вокруг частиц карбида вольфрама. Все это приводит к тому, что облучение породоразрушающего инструмента  $\gamma$ -квантами как при большой, так и при малой мощности дозы излучения снимает механические напряжения, повышает пластичность и предел упругости всего объема инструмента. При этом устраняются трещины и разрывы, уменьшается коэффициент трения твердого сплава, в котором закреплены алмазные зерна. Все это приводит к повышению работоспособности инструмента и повышению скорости бурения скважин в горных породах.

Упрочнение инструмента способами криогенной обработки или облучения позволяют увеличить проходку на коронку в 1,3–1,8 раза, уменьшить расход алмазных зерен на 30–40 %, повысить механическую скорость бурения на 15–20 %. Однако эти способы упрочнения инструмента снижают некоторые прочностные характеристики матриц. Так криогенная повышает хрупкость матриц, а облучение  $\gamma$ -квантами приводит к уменьшению микротвердости.

Для того, чтобы сохранить полученный при криогенной обработке положительный эффект (повышение микротвердости и жесткости), необходимо уменьшить хрупкость матрицы, увеличить ее пластичность (величину деформации) при сохранении или незначительном уменьшении твердости. Эта задача решается комплексной криогенно-радиационной обработкой, причем криогенная обработка рассматривается как низкотемпературная закалка, а облучение  $\gamma$  – квантами как радиационный отжиг или отпуск. При криогенно-радиационной обработке твердых сплавов ВК8 и Т15К6 предел прочности при изгибе повысился на 12,6 %, деформация увеличилась на 12 %, жесткость на 5 %, а микротвердость уменьшилась всего на 5,2 %. Это показывает, что криогенно-радиационный способ обработки породоразрушающего инструмента является наиболее эффективным способом повышения его качества.

### Список литературы

1. Ю.И. Пахаруков. Некоторые аспекты радиационного упорядочения // ФТП. – 1989. – Т. 23. – Вып. 5. – С. 909–911.
2. П.М. Кришеник, К.Г. Шкадинский. Высокотемпературный тепловой фронт с нелинейной теплопроводностью // ДАН. – 2003. – Т. 392. – № 6. – С. 761–766.
3. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.