

РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СТРУЙ

С. Д. Викторов, Н. Г. Демченко, А. П. Кузнецов

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020 Москва

Изложены результаты экспериментов по разрушению материалов струями химически активного по отношению к разрушаемому материалу вещества. Натриевая низконапорная струя воздействовала на водонасыщенные гипсовые образцы, прочность которых на сжатие была более чем на порядок выше давления торможения струи. Струя эффективно проникала в материал, дезинтегрируя его за счет тепловой энергии, выделившейся в результате химической реакции между веществом струи и разрушаемым материалом. Удельные энергозатраты, связанные с дезинтеграцией материала, могут быть уменьшены на несколько порядков по сравнению с механическим и гидроструйным способами.

Струйное разрушение материалов, в основном горных пород, осуществляется исключительно с использованием гидроструй [1, 2]. Пионерами исследования технологических возможностей гидроструй в СССР были Институт физики высоких давлений АН СССР, Институт гидродинамики Сибирского отделения АН СССР и Институт горного дела им. А. А. Скочинского Министерства угольной промышленности СССР. К настоящему времени стало ясно, что технологические возможности чистых водяных струй практически исчерпаны. Гидродинамическая неустойчивость струйных течений и высокая прочность материалов поставили естественную границу на пути более широкого использования струйной технологии разрушения. К тому же так и не удалось существенно уменьшить удельные энергозатраты по сравнению с механическими методами резания.

В настоящей работе рассматривается струйное разрушение материалов, включая и горные породы, с помощью химически активных струй (ХАС): вещество струи, оказавшись в контакте с разрушаемым материалом, вступает с ним в экзотермическую химическую реакцию. Выделившаяся в зоне контакта тепловая энергия способствует интенсификации процесса разрушения, а струйное течение непрерывно уносит продукты реакции и фрагменты разрушаемого материала, проникая в него и продолжая химически с ним взаимодействовать.

Использование химической энергии взаимодействия струи с разрушаемым материалом позволит уменьшить скорость течения струи

без уменьшения ее разрушительной способности. Это, с одной стороны, снизит энергозатраты на разрушение и упростит разработку и изготовление разрушающих машин, а с другой стороны, приведет к увеличению рабочей длины струи, а значит, и глубины резания.

Первые проведенные эксперименты [3] показали, что эффект от использования ХАС при разрушении материала может быть значительным. Импульсные натриевые струи, действуя на гранитные образцы (содержание воды в граните $\approx 1\%$), образовали воронки, объем которых почти на два порядка превышал объем воронок, образованных нейтральными струями. В этих же экспериментах обнаружен пороговый по скорости предел эффективной ХАС, а также явление «насыщения» эффекта действия ХАС по сравнению с действием нейтральной струи.

Для дальнейшего исследования взаимодействия ХАС и разрушаемого материала были проведены эксперименты по воздействию стационарной натриевой струи на водосодержащие образцы.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве разрушаемого материала использовался насыщенный водой гипс. Прочность образцов на раздавливание составляла $(7 \pm 1,4)$ МПа. Образец представлял собой куб с ребром 50 мм. Плотность гипса до насыщения его водой составляла $1,1 \cdot 10^3$ кг/м³. Насыщенный образец поглощал $\approx 22\%$ воды. Струя жидкого натрия подавалась под давлением $p = 0,3 \div 0,7$ МПа. Столь низкие значения рабочего давления, а вместе с ним и скорости

истечения струй ($20 \div 40$ м/с) взяты по нескольким причинам. Одна из них заключалась в том, чтобы вообще избавиться от эффектов механического струйного разрушения, вторая — чтобы уменьшить расход вещества струи, представляющего весьма высокую токсичную и пожарную опасность.

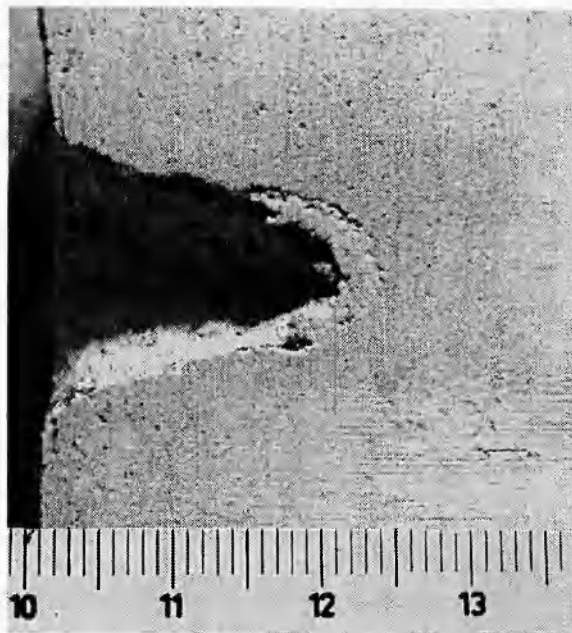
Опыты проводили в рабочей камере, снабженной окнами для наблюдения и системой вентиляции. При проектировании камеры и выработке мер безопасности использовали данные монографии [4]. Авторам настоящей работы пришлось, по-видимому, первыми столкнуться с проблемой обеспечения безопасности при работе с открытыми струями щелочного металла.

Предварительно были проведены опыты по воздействию на образец нейтральной струи (машинное масло, нагретое до $120 \div 150$ °С) при $p = 0,7$ МПа. Как и ожидалось, струя масла не оказала какого-либо разрушающего действия на образец. Для проведения основного эксперимента в загрузочную емкость помещали $30 \div 100$ г натрия. Емкость, продуваемую аргоном, разогревали. Температуру прогрева измеряли терпарой. Струя натрия выдавливалась аргоном через сопло диаметром 1 мм. Расстояние между срезом сопла и поверхностью образца равнялось 3 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Взаимодействие ХАС и материала образца начинается с момента их контакта, вызывая интенсивное разбрызгивание натрия. Одновременно в месте контакта интенсифицируется химическая реакция, что приводит к появлению дыма и потока искр. Камера, несмотря на довольно большие размеры (диаметр 0,5 м, длина 0,8 м), быстро заполняется дымом, сквозь который видны искры.

Время воздействия струи составляло $1 \div 5$ с. Ошибка измерения времени воздействия ХАС не превышала 0,1 с при фиксации начала воздействия и 0,2 с при фиксации окончания воздействия. Прекращение воздействия осуществлялось по команде на закрытие жидкометаллического вентиля. Одновременно останавливался отсчет секундомера. После окончания струйного воздействия и откачки камеры образец подвергался визуальному контролю, а образовавшаяся в нем каверна измерялась. Точность измерения размеров каверны и давления не превышала 10 %.



Для более детального рассмотрения профиля каверны образец разрезался алмазным кругом толщиной 0,5 мм. Результаты воздействия ХАС на разрушаемый материал даны в таблице. Разрез одной из образовавшихся каверн показан на фотографии.

Во всех опытах каверны имеют почти правильную коническую форму. В экспериментах № 1 и 2 форма и размеры каверн близки, несмотря на то, что времена воздействия струй различаются в три раза, а давления торможения струй — в 2,5 раза. В эксперименте № 3 каверна образовалась под действием трех коротких квазиимпульсных струй, общая длительность которых не превысила 1 с. В этом эксперименте возникла нештатная ситуация, связанная с неоднократным засорением канала сопла, что и привело к разрыву струи. Длительность воздействия при этом была оценена с заметно большей ошибкой, чем в двух предшествующих опытах.

Номер опыта	p , МПа	τ , с	h , мм	R , мм	V , см ³
1	0,5	2	21	8	1,6
2	0,2	6	18,5	8,5	1,6
3	0,5	≤ 1	7,2	4,5	0,22

Примечание. p — давление торможения струи; τ — время ее воздействия; h , R , V — видимая глубина, максимальный радиус и объем каверны.

Важно отметить, что во всех экспериментах на профиле каверн наблюдается слой «предразрушенного» материала. Этот слой в результате температурного воздействия уже практически потерял прочность и легко может быть смыт струйным течением.

Общая картина проникновения ХАС в разрушаемый материал следующая. Разрушение и смывание материала происходит после взаимодействия натрия с водой, содержащейся в материале. Выделяющееся в процессе реакции тепло поднимает температуру материала, уменьшая его прочность до полной ее потери в окрестности зоны контакта ХАС и разрушаемого материала. Вынос разрушенного материала происходит весьма интенсивно, а вновь образуемая поверхность позволяет проникать струе в новый слой разрушаемого материала, поддерживая протекание реакции. Вполне возможно, что такой режим разрушения может на определенной стадии принять характер прогрессирующего процесса с дальнейшей его стабилизацией.

Анализ полученного экспериментального материала позволяет выдвинуть рабочую гипотезу о средней скорости проникновения ХАС в разрушаемый материал. Можно предположить (в соответствии с результатами опытов № 1 и № 2), что произведение времени воздействия струи на давление ее торможения пропорционально глубине проникновения:

$$\tau p = kh,$$

где $k \approx 5 \cdot 10^7$ кг/(м²·с) — константа, характеризующая как прочностные (по отношению к температуре нагрева) свойства разрушаемого материала, так и теплофизические свойства процесса (удельная теплота реакции, а также теплоемкость, теплопроводность и плотность разрушаемого материала). Вполне вероятно, что определенную роль в исследуемом процессе будет играть и проницаемость разрушаемого материала по отношению к веществу ХАС.

Результаты экспериментов позволили сделать оценку энергоемкости дезинтегрирования материала с помощью ХАС. Удельные энергозатраты на разгон струи составляют $\approx 2 \cdot 10^4$ Дж/кг, что почти на три порядка меньше, чем удельные энергозатраты, связанные с дезинтеграцией этого же материала с помощью механического или гидравлического способа.

Как и при традиционном струйном разрушении, разрушение с помощью ХАС сопровождается большим удельным расходом вещества струи (отношение массы израсходованной на дезинтеграцию вещества струи к массе дезинтегрированного материала). Однако если для гидроразрушения этот фактор не считается критическим, то в случае разрушения с помощью ХАС он может существенно ограничить использование таких струй из соображений экологической безопасности. В связи с этим в ближайшем будущем внимание исследователей привлечет использование не только жидкостных, но и газовых ХАС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-05-64082).

ЛИТЕРАТУРА

1. Семерчан А. К. и др. Разрушение материалов тонкими жидкостными струями высокого давления // Технология разработки месторождений твердых полезных ископаемых. М.: ВИНТИ, 1976. С. 86–214.
2. Никонов Г. П., Кузмич И. А., Гольдин Ю. А. Разрушение горных пород струями высокого давления. М.: Недра, 1986.
3. Викторов С. Д., Кузнецов А. П. Действие струи химически активного вещества на горную породу // Докл. РАН. 1997. Т. 356, № 3. С. 337–338.
4. Перельман Р. Г. Проектирование и эксплуатация жидкометаллических систем. М.: Атомиздат, 1968.

Поступила в редакцию 21/V 1998 г.,
в окончательном варианте — 19/XI 1998 г.