

Таким образом, объемное деформирование металлов по всем основным операциям может быть интенсифицировано электроразрядным воздействием на очаг деформации совмещенным со статическим воздействием. При этом повышается степень деформации, качество получаемых изделий, производительность действующего оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев, 1983.
2. Корытов В.А., Малюшевский П.П. Применение электрического разряда в воде для интенсификации процессов обработки металлов давлением // Импульсные методы обработки материалов. Минск, 1977. С. 80–86.
3. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. Киев, 1983.
4. Барановский М.А., Стрикель Н.И., Короткевич В.Г. Распространение пластической деформации при высокоскоростном растяжении и сжатии металлических материалов // Импульсные методы обработки материалов. Минск, 1977. С. 148–152.

Поступила 09.10.2000

#### Summary

Basic operation's of electrodischarge intensification of voluminous deformation of metals research. Experimental research of basic operations of electrodischarge intensification of voluminous deformations of metals was worked out: precipitation, squeezing, calibration, surface's cleanliness improvement. It was determined that voluminous deformation of metals by basic operation can be intensified with electrodischarge influence to the hearth of deformation with static influence. Deformation's degree, quality of production, productivity of equipment increase.

---

А.Р. Ризун, В.М. Косенков

## К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
Октябрьский пр-т, 43-а, 54018, г. Николаев-18, Украина*

Возможность разрушения хрупких неметаллических материалов практически любой прочно-сти электроразрядным способом является экспериментальным фактом [1]. Однако при разработке технологии важное, а часто и принципиальное значение имеет производительность электроразрядного разрушения (дробления) блоков хрупких материалов, имеющих максимальные размеры от 500 до 200 мм на фрагменты, не превышающие 3 мм. Под производительностью дробления будем понимать массу разрушенного до заданных размеров материала, проходящего через зону дробления за единицу времени. Время дробления блоков до заданных размеров главным образом зависит от их прочностных характеристик, параметров электрического разряда, частоты повторения разрядов, взаимного расположения осколков материала. Названные характеристики процесса дробления в большей или меньшей степени имеют статистический характер, поэтому выполнить расчет процесса дробления материала с детерминистических позиций не представляется возможным. Однако производительность электроразрядного дробления можно оценить на основе ряда предположений:

- трещины в осколках возникают вблизи мест их взаимного контакта вследствие концентрации напряжений;
- дробление материала происходит в результате превышения касательными напряжениями предела прочности материала на сдвиг (скалывание) [2];

---

© Ризун А.Р., Косенков В.М., Электронная обработка материалов, 2001, № 2, С. 45–50.

- в результате электрического разряда осколки материала, находящиеся в зоне дробления, делятся на две равные части;
- начальный объем осколков равен объему зоны дробления;
- объем зоны дробления  $V_d$  определяется расстоянием между электродами  $l$  и радиусом зоны дробления  $R_d$ , то есть

$$V_d = \pi \cdot l \cdot R_d^2 ; \quad (1)$$

– при достижении осколками заданных размеров ( $a_{min}$ ) они удаляются из зоны дробления.

Учитывая принятые допущения, формулу оценки производительности дробления хрупких материалов электрическими разрядами можно получить в следующей логической последовательности.

Объем осколков после  $n$  разрядов будет составлять

$$V_n = V_d / 2^n , \quad (2)$$

тогда

$$n = \ln(V_d / V_n) / \ln 2 . \quad (3)$$

Начальный ( $a_0$ ) и конечный ( $a_{min}$ ) размеры осколков свяжем с их объемами соотношениями

$$a_0 = \sqrt[3]{V_d} ; a_{min} = \sqrt[3]{V_n} , \quad (4)$$

тогда формулу (3) можно преобразовать к виду

$$n = 1,443 \cdot \ln[(a_0 / a_{min})^3] . \quad (5)$$

При частоте электрических разрядов  $f$  осколки материала, находящиеся в объеме  $V_0$ , достигают размеров  $a_{min}$  за время

$$t = n / f , \quad (6)$$

и вследствие этого объемный расход материала через зону дробления составит

$$V_R = V_d / t . \quad (7)$$

Учитывая, что разрядных промежутков может быть  $k$ , а плотность материала равна  $\rho$ , массовый расход материала через зону дробления (производительность дробления) определяется зависимостью

$$G_n = k \cdot \rho \cdot V_d / t , \quad (8)$$

или, учитывая (1) и (6), окончательно получим

$$G_n = \pi \cdot k \cdot \rho \cdot f \cdot l \cdot R_d^2 / [1,443 \cdot \ln(\pi \cdot l \cdot R_d^2 / a_{min}^3)] . \quad (9)$$

Анализ формулы (9) показывает, что производительность электроразрядного дробления хрупких неметаллических материалов определяется шестью параметрами. Пять из них зависят от условий электрического разряда и конструкции разрядной камеры. Определение их величин не представляет затруднений. Однако определение радиуса зоны дробления ( $R_d$ ) вызывает ряд проблем и требует проведения предварительных исследований.

Величина  $R_d$  может быть определена на основе экспериментальных исследований или математического моделирования процесса дробления хрупких материалов.

Экспериментальное определение  $R_d$  производилось путем осуществления электрических разрядов в зазоре между двумя блоками хрупких материалов, имеющих форму параллелепипедов и отмеченных на рисунке цифрой 1. Разрядная камера 2 имела форму параллелепипеда (см. рисунок) с размерами, значительно превышающими радиус зоны дробления. На ее дно уложены плотно друг к другу два блока хрупких материалов. Величина зазора между ними определялась только размерами шероховатостей соприкасающихся поверхностей. Корпус разрядной камеры заземлен. К зазору между исследуемыми материалами подведен наконечник электрода 3, на который подается положительный заряд. Поверхность электрода (кроме наконечника) закрыта электрическим изолятором 4. Остальной объем разрядной камеры заполнен водой 5. После выполнения одного электрического

разряда в блоках хрупких материалов возникала сетка трещин. В качестве радиуса зоны разрушения материала принималось расстояние от вершины наконечника электрода до наиболее удаленной от него трещины. Для уменьшения погрешности измерений каждый опыт повторялся три раза. Перед очередным разрядом разрушенные блоки заменялись неразрушенными. В конденсаторной батарее запасали  $E_0 = 2,5$  кДж энергии при напряжении  $U_0 = 50$  кВ. Длина разрядного промежутка определялась толщиной блоков и составляла 35 мм. Измерения выполнялись для трех видов материалов, отличающихся главным образом пределами прочности на сжатие, составляющими 5, 12, 17 МПа. Измеренные радиусы разрушения материалов изменяются обратно пропорционально их прочности и достигают 49, 30, 27 мм соответственно. Воспользовавшись этими данными и формулой (9), получаем производительность процесса дробления 713, 530, 470 кг/час.

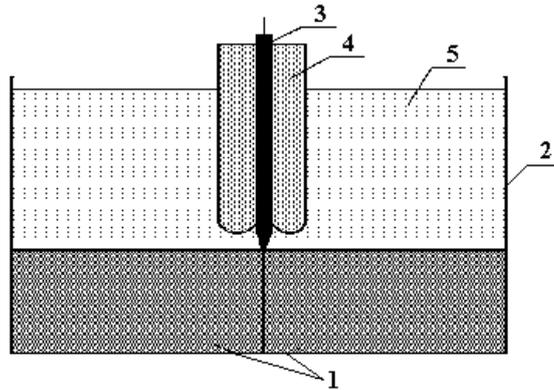


Схема эксперимента.

Математическое моделирование электроразрядного дробления хрупких неметаллических материалов может быть выполнено на основе известной и достаточно надежно апробированной математической модели динамики пористых насыщенных жидкостью сред [3–5].

При формулировке математической модели использован ряд традиционных допущений, что вполне оправдано для рассматриваемого круга проблем:

- пористая среда изотропна и насыщена однофазной вязкой сжимаемой жидкостью;
- материал матрицы пористой среды упрочняется за счет сил внутреннего трения по закону Кулона;

– начало процесса образования трещин отрыва соответствует условию первой теории прочности;

- образовавшиеся трещины не заполнены жидкостью;
- перенос загрязняющих поры веществ не влияет на деформирование и разрушение матрицы;
- остаточная объемная деформация матрицы пористой среды пренебрежимо мала.

Исходя из принятых допущений, система уравнений, описывающая процесс распространения возмущений в пористой насыщенной жидкостью среде, может быть представлена в виде

$$[(1-m)\rho_1]_t + [(1-m)\rho_1 u_i]_i = 0, \quad (10)$$

$$[m\rho_2]_t + [m\rho_2 w_i]_i = 0, \quad (11)$$

$$[(1-m)\rho_1 u_i]_t + [(1-m)\rho_1 u_j u_i]_j = \sigma_{ij,j}^f - (1-m)p_i - R_i, \quad (12)$$

$$[m\rho_1 w_i]_t + [m\rho_1 w_j w_i]_j = -mp_i + R_i, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & [(1-m)\rho_1(\varepsilon_1 + u_i u_i / 2)]_t + [(1-m)\rho_1(\varepsilon_1 + u_i u_i / 2)u_j]_j = \\ & = [\sigma_{ij}^f u_j]_j + \bar{W}_{u,t}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$[m\rho_2(\varepsilon_2 + w_i w_i / 2)]_t + [m\rho_2(\varepsilon_2 + w_i w_i / 2)w_j]_j =$$

$$= [mpw_i]_{,i} + \bar{W}_{w,t} , \quad (15)$$

$$\bar{W}_{u,t} = -pm_{,t} - R_i u_i , \quad (16)$$

$$\bar{W}_{w,t} = -pm_{,t} - R_i w_i , \quad (17)$$

$$R_i = \mu_2 \frac{m^2}{k} f(Re)(u_i - w_i) , \quad (18)$$

$$Re = \frac{\rho_2}{\mu_2} \sqrt{\frac{k}{m}} |u - w| , \quad (19)$$

$$\sigma_{ij}^f = (1 - m) [S_{ij} - (\sigma - \varepsilon^* p) \delta_{ij} + \rho_{ij}] , \quad (20)$$

$$\dot{S}_{ij} = 2G \left( \dot{e}_{ij} + \frac{\dot{\rho}_1}{3\rho_1} \delta_{ij} \right) , \quad (21)$$

$$\dot{\rho}_{ij} = 2g e'_{ij} , \quad (22)$$

$$\varepsilon^* = \frac{K_u}{K} , \quad (23)$$

$$\dot{\sigma} = -K_u \dot{e} , \quad (24)$$

$$\sigma \geq -\frac{1}{3} \sigma_r , \quad (25)$$

$$\dot{e} = \dot{e}_{11} + \dot{e}_{22} + \dot{e}_{33} , \quad (26)$$

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) , \quad (27)$$

$$S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) \leq \frac{2}{3} (\sigma_T + \alpha\sigma)^2 , \quad (28)$$

$$\sigma_T = \begin{cases} \sigma_r , & \text{при } \sigma < 0 \\ \sigma_{sg} , & \text{при } \sigma \geq 0 \end{cases} , \quad (29)$$

$$p = c_0^2 (\rho_2 - \rho_{20}) + (\kappa - 1) \rho_2 \varepsilon_2 , \quad (30)$$

$$p \geq p_s , \quad (31)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \rho_{10}, \rho_{20}$  – плотность материала твердой и жидкой фаз, соответственно в возмущенном и невозмущенном состояниях;  $m$  – пористость матрицы;  $u_i, w_i$  – компоненты вектора скорости твердой

и жидкой фаз ( $i=1,2,3$ );  $p$  – давление жидкости;  $\sigma_{ij}^f$ ,  $S_{ij}$  – тензор и девиатор тензора эффективных напряжений;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – внутренняя энергия твердой и жидкой фаз;  $f(Re)$  – функция влияния режима течения на межфазовое взаимодействие [3];  $Re$  – число Рейнольдса для пористой среды;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости;  $k$  – коэффициент проницаемости пористой среды;  $e_{ij}$ ,  $e'_{ij}$  – полная и пластическая компоненты тензора деформаций;  $G$  – модуль сдвига матрицы;  $K_{lv}$ ,  $K$  – модуль объемного сжатия матрицы и модуль объемного сжатия материала матрицы;  $\sigma$  – среднее напряжение в матрице;  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{sg}$  – предел текучести матрицы на сжатие и растяжение, соответственно;  $p_s$  – давление насыщенных паров жидкости;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\rho_{ij}$  – тензор микронапряжений;  $g$  – модуль упрочнения матрицы;  $\kappa$  – эмпирический коэффициент жидкости;  $c_0$  – скорость звука в невозмущенной жидкости;  $\alpha$  – коэффициент внутреннего трения материала матрицы; (запятые в индексах означают ковариантное дифференцирование, а точки над символами – производные по времени).

Уравнения (10)–(15) описывают законы сохранения массы, импульса и энергии в твердой матрице и насыщающей ее жидкости [3]. Межфазовое взаимодействие сред учитывается соотношениями (16)–(19) в соответствии с гипотезой Н.Е. Жуковского. Связь между деформациями и напряжениями устанавливается на основе обобщенного закона Гука (20) с использованием теории пластического течения (21). Поверхность пластического течения, с учетом упрочнения по закону Кулона, описывается модифицированным условием Губера-Мизеса (28) [6]. Скорости деформаций и перемещений связаны геометрическими соотношениями (27). Соотношения (24), (30) и (31) являются уравнениями состояния твердой и жидкой фаз.

Процесс разрушения от сжатия матрицы пористой среды происходит при выполнении условия

$$S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) = \frac{2}{3}([\sigma]_{sg} + \alpha\sigma)^2, \quad (32)$$

где  $[\sigma]_{sg}$  – предел прочности матрицы на сжатие.

Образование трещин отрыва, с приемлемой для практики точностью расчетов разрушения хрупких сред, происходит при выполнении условия первой теории прочности [7]

$$\sigma_{ii} \geq [\sigma]_r, \quad (33)$$

где  $[\sigma]_r$  – предел прочности матрицы на растяжение.

Образующаяся при этом трещина перпендикулярна направлению наибольшего напряжения. Учитывая осевую симметрию задачи, можно утверждать о совпадении направлений наибольших и наименьших нормальных напряжений с координатными осями, вследствие чего образующиеся трещины также будут направлены параллельно координатным осям.

В области разрушения матрицы от сжатия, пределы прочности и текучести материала на растяжение полагаются равными нулю

$$[\sigma]_r = 0; \quad \sigma_r = 0. \quad (34)$$

В направлении, перпендикулярном трещине отрыва, предел прочности на растяжение равен нулю. Если берега трещины не контактируют между собой (ширина трещины  $h_n > 0$ ), тогда перпендикулярные к ним нормальные компоненты напряжений ( $\sigma_n$ ) полагаются равными нулю. При этом компоненты сдвиговых напряжений ( $\sigma_\tau$ ), направленные вдоль трещин, тоже равны нулю

$$\sigma_n = 0; \quad \sigma_\tau = 0. \quad (35)$$

Система уравнений (10) – (35) должна быть дополнена соответствующими начальными и граничными условиями. На непроницаемых поверхностях задаются условия непротекания

$$u_n = w_n, \quad (36)$$

где  $u_n$ ,  $w_n$  – компоненты скоростей твердого тела и жидкости, нормальные к поверхности границы. На проницаемых поверхностях задаются условия типа “жидкий” поршень [3]

$$\sigma_{nm}^f = 0; \quad p_f = p_p, \quad (37)$$

где  $\sigma_{nn}^f$  – компонента тензора эффективных напряжений, нормальная к поверхности границы;  $p_f, p_p$  – давление жидкости в однофазной и пористой средах соответственно.

До начала электрического разряда окружающая среда находится в невозмущенном состоянии.

Параметры электрического разряда, а также давление жидкости на пористую среду ( $p_p$ ) определялись согласно методике [8].

Решение системы уравнений (10)–(37) выполнялось по методу изложенному в работе [5]. В результате решения определялась величина радиуса зоны дробления, с помощью которого вычисляли производительность электроразрядного дробления по формуле (9). В качестве разрушаемого материала использовали карборундсодержащие плиты из доломита, миндлита и кварцита, прочностные характеристики которых приведены в работе [2].

В качестве примера, приведем результаты математического моделирования разрушения плиты карборундсодержащего материала, имеющего предел прочности на сжатие 17 МПа, а предел прочности на скалывание 0,9 МПа. Результаты расчетов и соответствующие им данные эксперимента приведены в таблице.

#### Результаты моделирования электроразрядного дробления материалов

№ п/п	$E_0$ , кДж	$k$	$f$ , Гц	$a_{min}$ , мм	$R_d$ , мм	$G_n$ , кг/час	
						теория	эксперимент
1	1,25	1	4	1	30,7	223	-
2	1,25	1	4	3	30,7	356	-
3	2,5	1	2	1	49	265	-
4	2,5	1	2	3	49	425	470

Удовлетворительное согласование теоретических и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности математической модели реальным условиям дробления хрупких материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ризун А.Р. Технология разрушения неметаллических материалов электровзрывом // Тез. докл. “Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности”. Николаев, 1992. С. 175.
2. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. М., 1980.
3. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М., 1984.
4. Быков И.Г., Николаевский В.Н. Нелинейные волны в пористых насыщенных средах // Докл. РАН. 1993. Т. 328. № 1. С. 35–38.
5. Косенков В.М. Математическая модель динамики пористых насыщенных жидкостью упругопластических сред при электрическом разряде в воде // Проблемы прочности. 1997. № 1.
6. Механический эффект взрыва в грунтах / Под ред. И.А. Лучко. Киев, Наукова думка, 1989.
7. Майнчен Дж., Сак С. Метод расчета “Тензор” // Вычислительные методы в гидродинамике. М., 1967. С. 185–211.
8. Методика расчета гидродинамических и электрических характеристик канала разряда электрогидравлических установок. / АН УССР. Проектно-конструкторское бюро электрогидравлики: Сост. Ризун А.Р., Иванов В.В., Рыбка О.М. Киев, 1982.

Поступила 25.11.2000

#### Summary

A method for crushing brittle non-metallic material output calculation is proposed. A number of assumptions the method is based upon are presented. Six parameters are determined to affect the output of crushing. It is ascertained that one of them (the radius of crushing zone) can not be given on the base of the material parameters or the parameters of the electric discharge installation. But it can be determined experimentally or by mathematical modeling of the crushing process. The methods of experiment and mathematical model for determination of the crushing zone radius are stated. The results of crushing productivity calculation obtained according to the method proposed agree satisfactorily with experimental data.