

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ БАЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОБЪЕМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 327018, Украина*

Подводный электрический разряд достаточно активно используется для листовой штамповки [1] и совершенно недостаточно для интенсификации процессов объемного деформирования материалов [2, 3].

Существует несколько причин, сдерживающих развитие этого метода высокоскоростного деформирования материалов. Две из них очевидны: существование критических скоростей деформирования, после достижения которых материал разрушается; отсутствие экспериментальных данных о простейших, но базовых операциях объемного деформирования металлов в поле виброимпульсного воздействия подводных электрических разрядов.

Что касается критической скорости деформирования, то авторами [4] теоретически показано, что она существует только для одноосного растяжения. При динамическом сжатии скорость распространения пластической деформации не обращается в нуль даже при равенстве нулю динамического модуля упрочнения. Кроме того, экспериментально было установлено [2], что при растяжении стандартных образцов из стали Ст.3 в поле последовательности импульсов упругих колебаний, которые генерирует электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК), относительное удлинение увеличивается на 25-37%. При этом образуется и утоняется шейка.

Расплющивание свинцовых образцов между стальными калеными плитами в статическом режиме приводит к множественным радиальным разрывам деформируемого металла. Такие же свинцовые образцы при таком же расплющивании, но в поле последовательности импульсов упругих колебаний, не только расплющиваются без единого разрыва, а просто вытекают из-под плит. Это прямые доказательства увеличения пластичности металлов под воздействием высокоинтенсивных импульсов упругих колебаний.

Таким образом, созданы предпосылки интенсификации процессов объемного деформирования металлов. Однако, как влияют мощные импульсы упругих колебаний на основные базовые операции объемной обработки металлов давлением, не было выяснено.

В наших экспериментальных исследованиях упругие колебания в очаг деформации подавались от ЭРГУК, который закреплялся на подштамповой плите так, что импульсы передавались непосредственно в технологический узел. Этот метод называют общим названием “метод виброимпульсной интенсификации процессов обработки материалов давлением”. В целом лабораторное оборудование было аналогичным описанному в [2]. ЭРГУК представлял электроразрядную камеру с жесткими стенками и эластично-подвижным элементом, передающим импульс упругих колебаний во внешнюю среду. Последний был выполнен в виде стальной плиты, соединенной с корпусом ЭРГУК посредством эластичной кольцевой подвески из листовой вакуумной резины. Энергия в импульсе до 1 кДж, частота следования импульсов до 50 Гц. Общий импульс ЭРГУК характеризуется крутым передним фронтом и выпуклым спадом, что обеспечивает его широкополосность от 25 до 120 000 Гц. Основная (до 90%) энергия выносится в интервале частот 1000–3500 Гц.

Были выполнены сравнительные исследования виброимпульсного метода нагружения со статическим, пульсирующим и падающим грузом (вертикальный копер) при испытаниях на растяжение стандартных образцов из отожженной и неотожженной конструкционной стали 45.

Наибольшее относительное удлинение и относительное сужение получены при нагружении импульсами ЭРГУК с энергией 500 Дж, частотой следования – 30 Гц. Статическое усилие при этом было нулевым. Наименьшее значение эти характеристики имели в случаях статического нагружения

и нагружения пульсацией силы, создаваемых гидропульсатором машины МУП-20. Промежуточное положение занимает нагружение серией ударов падающего груза на копре. В среднем степень деформации при нагружении импульсами ЭРГУК по отношению к статическому нагружению увеличилась на 52%.

Рекогносцировочные исследования по осаживанию стальных (сталь 20 в состоянии поставки) образцов выполнялись на прессе ПММ-125 с ЭРГУК. Энергия в импульсе варьировалась от 750 до 1000 Дж. Осадка производилась в приспособлении, позволявшем резко уменьшить контактное трение путем введения смазки.

Образцы, осаживаемые с наложением импульсов ЭРГУК, имеют в среднем большую степень деформации на 16–20 % и меньшее упрочнение (по измерениям твердости контактных поверхностей). Кроме того, существенно сокращается время достижения заданной деформации. Главное же, что удалось установить – это снижение статического усилия деформирования практически до нуля (рис. 1).

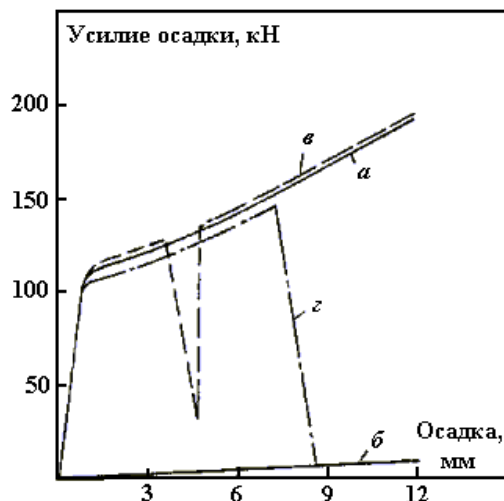


Рис. 1. Изменение усилия осадки от ее величины: а – статический режим; б – ЭРГУК включен с начала процесса осаживания; в – статический режим с наложением одиночного импульса ЭРГУК; г – после фазы чисто статического деформирования, ЭРГУК включен до конца осаживания.

Система статического нагружения образцов при этом очень гибко реагирует на включение ЭРГУК немедленным снижением усилия осадки. Снижение усилия наблюдается как при увеличении энергии в импульсе, так и при увеличении частоты посылок импульсов. Последний фактор носит более быстрый характер до частот 30–35 Гц, а после 40 Гц значительно (примерно в 2 раза) уменьшается.

Объяснить снижение усилия при нагружении совместно статическим усилием и импульсами ЭРГУК можно прерывистостью нагружения системы с инерционными свойствами.

Рассмотрим для определенности, например, осадку образца от высоты h_i до высоты h_j за один импульс при скорости подъема стола пресса v и частоте посылок импульсов f . Так как длительность импульса, в течение которой возникает деформация $\Delta h = h_i - h_j$, мала по сравнению с периодом импульса T , то предположим, для упрощения, что деформация Δh возникает мгновенно, после чего упругий элемент ЭРГУК возвращается в исходное положение. Если $v \leq \Delta h/T$, то $p_{ст} = 0$ в течение всего T . При $v > \Delta h/T$ статическое усилие будет приложено в течение части α периода T .

Для того, чтобы статическое усилие вновь было приложено к образцу, необходимо столу пройти путь $\Delta h = (1 - \alpha)T$, (здесь T – время, в течение которого статическое усилие $p_{ст} = 0$), что очевидно.

Игнорируя переходные процессы, можно принять, что образом статического движения является прямоугольный импульс, ограниченный передними фронтами каждых двух импульсов ЭРГУК. То есть, растягивая импульс статического давления на период T , получим кажущееся усилие p_ϕ . Из равенства импульсов $p_{ст} \alpha T = p_\phi T$ получим важное отношение $p_\phi/p_{ст} = \alpha$. В то же время из выражения для Δh находим $\alpha = 1 - \Delta h f/v$. Так как $f = 1/T$, то $p_\phi/p_{ст} = 1 - \Delta h f/v$.

Это последнее выражение применимо для всех видов обработки давлением при наличии деформации, совпадающей по направлению с приложенным статическим усилием и позволяет

приблизительно оценить влияние главных факторов на снижение рабочего усилия пресса. Снижение усилия будет тем больше, чем выше частота посылок импульсов, больше величина деформации на импульс (амплитуда основного импульса ЭРГУК) и меньше скорость хода стола. Отсюда видна роль ЭРГУК – он должен создать усилие (самостоятельно или в сложении с усилием пресса), необходимое для пластического деформирования в очаге деформации.

При больших деформациях, создаваемых только ЭРГУК и при соответствующих частоте и скорости хода стола, усилие пресса может быть снижено на 100 % и его роль сводится только к подаче стола с заготовкой к ЭРГУК. При этом необходимо отметить, что с увеличением степени деформации, деформация за импульс уменьшается и в пределе становится равной нулю. Снижение усилия в этом случае, при достаточной жесткости пресса, может не происходить. Отсюда и очевидна роль инерционных и упругих характеристик системы пресс – очаг деформации – ЭРГУК.

Однако следует учитывать, что кроме того виброимпульсное нагружение обуславливает улучшение условий течения металла, разблокирование дислокаций, быструю релаксацию касательных напряжений, интенсификацию других глубоко внутренних процессов в деформируемом металле.

Важными, основными (типовыми) операциями в процессах обработки металлов давлением являются объемная штамповка, выдавливание, вытяжка.

В этом плане были поставлены эксперименты по выяснению влияния импульсного электро-разрядного воздействия на снижение статического усилия пресса и увеличение допустимой степени деформации.

Эксперименты осуществлялись, как и при осаживании, на прессе ПММ-125, снабженном ЭРГУК. Штамповалась деталь типа “втулка с перемычкой”. Смазка – масло индустриальное 20.

На рис. 2 и в табл. 1 представлены некоторые результаты экспериментов.

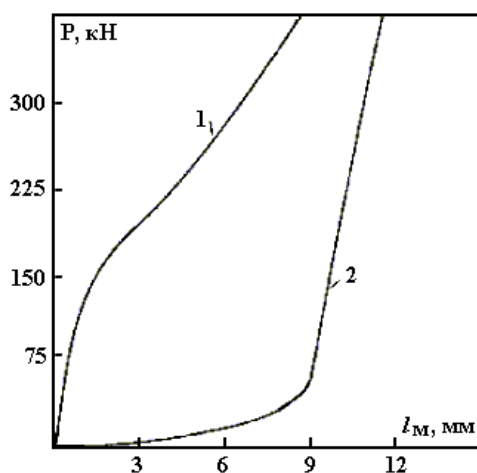


Рис. 2. Зависимость усилия пресса от деформации заготовки из сплава АМг-5: статическим усилием (1), статическим усилием с одновременным воздействием ЭРГУК (2).

Как видно из рисунков и таблицы при наложении импульсов ЭРГУК возникает снижение усилия пресса в течение всего процесса штамповки до величин деформаций, соответствующих статической деформации. При доведении усилия пресса в процессе штамповки с ЭРГУК до соответствующего статическому, деформации образцов увеличиваются. Соответственно снижение усилия деформирования составляет 35 %. Во всех случаях при наложении импульсов ЭРГУК наблюдалось лучшее заполнение штампа и меньшая высота облоя.

При аналогичных экспериментах с заготовкой из свинца статическое усилие пресса вообще не возникало. Полностью сформированные заготовки получались одним воздействием ЭРГУК за время меньше 1,6 с при частоте посылок импульсов 15 Гц. Кстати, свинец при нормальных условиях полностью моделирует сталь при температуре горячей обработки.

Так как обратное выдавливание по сравнению с прямым характеризуется более сложными и тяжелыми условиями работы инструмента и течения металла, именно ему было уделено основное внимание в наших экспериментах.

Выдавливались два вида образцов: с конической частью, рекомендуемой технологией статического выдавливания и с плоским дном, при котором условия течения металла ужесточаются. Материалы образцов: сталь специальная, медь МЗ, сплав АМг-5. Размеры стальных заготовок: диаметр – 26 мм, высота – 12,5 мм; медных и АМг-5 заготовок: диаметр – 25,5 мм, высота – 12,6 мм.

Таблица. 1. Результаты экспериментов по штамповке втулок из сплава АМг-5

№ образца	Высота, мм	Толщина перемещения, мм	Высота облоя, мм	Диаметр, мм	Диаметр облоя, мм	Усилие, кН	Число импульсов, ед	Динам. время, с	Частота, Гц	Режим обработки
3	22,7	14,22	8,5	32,2	34,8	400	–	–	–	Статический
5	24,0	11,43	5,3	32,2	37,4	560	–	–	–	Статический
2	23,6	11,13	4,8	32,2	38,0	410	478	59,8	8	Динамический
4	24,4	10,22	3,5	32,2	40,4	590	884	60,0	14,7	Динамический

При воздействии только ЭРГУК в названных режимах без одновременного статического усилия деформация стальных образцов чрезвычайно мала. Это означает, что усилие, развиваемое ЭРГУК в выбранном режиме, недостаточно для пластической деформации образца принятых размеров. Влияние ЭРГУК на величину выдавливания увеличивается по мере возрастания статического усилия и наиболее заметно при достижении второй зоны текучести. В это время воздействие ЭРГУК положительно влияет на увеличение степени деформации образцов.

Так как деформация за один импульс очень мала, снижение усилия для стальных образцов не наблюдалось. Для образцов из меди и сплава АМг-5 соотношение усилия данного ЭРГУК и усилия, необходимого для пластической деформации более благоприятны. И те, и другие образцы удавалось выдавливать только действием ЭРГУК. Однако в сочетании со статическим усилием, как меньшим предела текучести примерно в 2 раза, так и при равном ему, процесс выдавливания значительно ускоряется, а достигаемая степень деформации существенно увеличивается. При этом происходит также снижение усилия пресса, как это видно на диаграмме рис. 3.

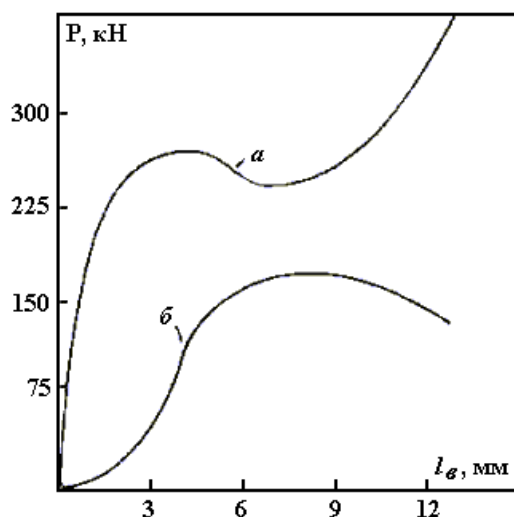


Рис. 3. Зависимость усилия пресса от деформации при обратном выдавливании медных образцов: при статическом усилии (а), статическое усилие плюс ЭРГУК (б).

Кроме экспериментов по обратному выдавливанию были проведены эксперименты по выдавливанию полостей штампов с помощью мастер-детали. Выдавливание производилось в плите из стали марки Ст.3 с твердостью поверхности по Бринелю – НВ = 110, по HRB – 56.

В качестве мастер-детали использовались: шарик диаметром 15,96 мм, ролик конический со средним диаметром 12,96 мм и длиной 22,5 мм, ролик бочкообразный конический с диаметром оснований 16,5 и 16,0 мм, средним диаметром 16,98 мм и длиной 15,0 мм, а также сложная конфигурация

в виде шестерни с числом зубьев 15 и наружным диаметром 20 мм, имеющая отверстие в центре. Ролики вдавливались и образующей, и торцами.

Все опыты по выдавливанию производились с одним и тем же статическим усилием прессы – 180–200 кН. Частота ЭРГУК – 22–26 Гц.

Для оценки эффективности процесса виброимпульсного выдавливания по сравнению со статическим выполнялось сравнение объемов выдавленных полостей при равных статических усилиях. Выдавливание цилиндрической полости торцом ролика

$$\Delta V/V = (V_2 - V_1)/V_1 = (h_2 - h_1)/h_1 = (\Delta h/h_1)100\%,$$

где V_1 – объем полости при статическом нагружении; V_2 – объем полости при виброимпульсном выдавливании.

Для ролика диаметром 16,98 мм : $\Delta h/h_1 = (1,6 - 0,8)/0,8 = 100\%$; для ролика диаметром 12,69 мм : $\Delta h/h_1 = (3,5 - 2,5)/2,5 = 40\%$.

Зная твердость материала плиты по Бринелю, диаметр вдавливаемого шарика и диаметр отпечатка, можно определить усилие вдавливания в обоих случаях нагружения. В случае статического нагружения – это будет максимальное действительное усилие, а в случае совместного действия статического усилия и импульсного (ЭРГУК) – усилие определенное таким образом, будет равняться статическому усилию, которое могло бы дать отпечаток, соответствующий полученному в эксперименте.

Число твердости по Бринелю

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}.$$

Отсюда

$$P = 0,5\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})HB.$$

Здесь P – усилие вдавливания; D – диаметр шарика; d – диаметр отпечатка; HB – число твердости по Бринелю.

Определив P по двум отпечаткам, полученным при чисто статическом и при совместном действии статического и импульсного усилий, по их разности $\Delta P = P_2 - P_1$, можно найти эффект снижения усилия. В нашем случае $P_1 = 14,8 \cdot 10^3$ Н, $P_2 = 20,5 \cdot 10^3$ Н. Таким образом пересчетное снижение усилия составляет $5,7 \cdot 10^3$ Н или относительное снижение усилия – 27,8%.

В табл. 2 приведены результаты по выдавливанию полостей в стальной плите мастер-деталью.

Из табл. 2 и примеров расчета видно, что виброимпульсное выдавливание значительно эффективнее статического.

Наконец, самостоятельная пара основных операций электроразрядной интенсификации объемного деформирования металлов – это калибровка и улучшение чистоты поверхности.

Для определения возможности улучшения качества поверхности при операциях калибровки изделий в штампах были изготовлены образцы из отожженной стали У8А в виде пластинок $40 \times 15 \times 4$ мм³, обработанных с одной стороны с чистотой поверхности по 3 классу, а с другой – по 5–6 классу. Образцы устанавливались в приспособление для осадки между плоскими бойками, рабочие поверхности которых имели чистоту по 7 классу. Обработка образцов производилась на прессе ПММ-125, снабженном ЭРГУК. Класс чистоты поверхности определяли с помощью профилографа модели 201 завода “Калибр” и сравнивали с эталонами чистоты.

Как известно, при статическом сдавливании шероховатость поверхности снижается значительно меньше, чем при сдавливании микронеровностей с одновременным перемещением инструмента поперек или вдоль рисок микронеоднородности. Этому способствуют силы трения между инструментом и деталью, изменяющие в таком случае схему напряженного состояния материала гребешков и создающие иное, более благоприятное направление деформации. ЭРГУК по принципу своей работы генерирует и касательную составляющую нагрузки и, следовательно, при виброимпульсной обработке силы трения должны оказывать меньшее сопротивление деформированию гребешков. Именно этому способствует тангенциальное смещение инструмента относительно поверхности заготовки. Такие предпосылки полностью подтвердились положительными результатами обработки образцов. Экспериментальные данные приведены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты выдавливания полостей различным нагружением

Характеристика вдавливаемого тела	Характеристика выдавленной полости	Режим выдавливания
Шар $D = 15,96$ мм	Диаметр 13,5 мм Глубина 3,5 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па
Шар $D = 15,96$ мм	Диаметр 14,6 мм Глубина 4,2 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУ(40 кВ; 21,7 Гц)
Торец ролика $D = 16,98$ мм	Диаметр 17,0 мм Глубина 0,8 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па
Торец ролика $D = 16,98$ мм	Диаметр 17,0 мм Глубина 1,6 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(40 кВ; 24 Гц)
Боковая поверхность ролика $D = 16,98$ мм	Наибольшая ширина 11,8 мм Глубина 2,7 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па
Боковая поверхность ролика $D = 16,98$ мм	Наибольшая ширина 13,0 мм Глубина 3,1 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(36 кВ; 23 Гц)
Торец ролика $D = 12,69$ мм	Диаметр 12,7 мм Глубина 2,5 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па
Торец ролика $D = 12,96$ мм	Диаметр 12,7 мм Глубина 3,5 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(40 кВ; 24 Гц)
Боковая поверхность ролика $D = 12,69$ мм	Наибольшая ширина 8,5 мм Глубина 1,3 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па
Боковая поверхность ролика $D = 12,69$ мм	Наибольшая ширина 9,7 мм Глубина 2,0 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(40 кВ; 21 Гц)
Шестерня $D = 20$ мм	Диаметр 20 мм Глубина 0,5 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па
Шестерня $D = 20$ мм	Диаметр 20 мм Глубина 0,75 мм	Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(36 кВ; 26 Гц)

Таблица 3. Экспериментальные данные по улучшению поверхности образцов У8А

№ образца	T_0 , мм	T_1 , мм	ε , %	P , Н	U_0 , кВ	n , ед.	τ , с	f , Гц	HRB начальное	HRB конечное	Кл. ш. до обработки	Кл. ш. после обработки
контроль	4,05	–	–	–	–	–	–	–	92,5	–	3	–
3	3,96	3,89	1,77	600	–	–	–	–	92,5	–	3	7а
9	3,82	3,53	7,60	600	–	–	–	–	92,5	95,6	3	7
6	3,86	3,58	7,26	–	34	113	5,0	22,6	92,5	94,3	3	7-8
1	4,04	3,94	2,48	–	33	91	9,45	9,1	92,5	94,5	3	5-6
2	4,01	3,92	2,24	–	31,5	202	18,6	10,8	92,5	95,8	3	6б
4	3,95	3,75	5,07	600	35	171	18,82	9,1	92,5	95,8	3	7б
5	4,02	3,74	6,98	600	35	144	19,0	7,6	92,5	95,8	3	8а
7	3,90	3,49	10,5	600	35	113	5,2	21,8	92,5	95,8	3	8а

Примечание: T_0 – начальная толщина образца; T_1 – конечная толщина образца; ε – относительная степень деформации; P – статическая нагрузка; U_0 – напряжение зарядки; n – число импульсов ЭРГУК; τ – время работы ЭРГУК; f – частота следования импульсов; HRB – твердость; Кл.ш. – класс шероховатости.

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];