

04;05;12

## Формирование брикетов из отдельных металлических частиц под воздействием коротких импульсов электрического тока большой плотности

© К.Б. Абрамова,<sup>1</sup> Ю.Н. Бочаров,<sup>2</sup> С.Д. Самуйлов,<sup>1</sup> И.П. Щербаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: abramova.mhd@pop.ioffe.rssi.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: elmf-dean@phf.stu.neva.ru

(Поступило в Редакцию 13 марта 2000 г.)

Выполнены теоретические оценки и проведено экспериментальное исследование процесса формирования брикетов из смеси отдельных металлических частиц, пространство между которыми заполнено диэлектриком (воздухом), под воздействием коротких импульсов электрического тока большой плотности. Исследовались 4 группы образцов, исходно состоящие из отдельных фрагментов металла и диэлектрика в различном соотношении. Получены осциллограммы тока и напряжения на образце; измерены электрическое сопротивление образца до и после пропускания электрического тока, температура образца после пропускания тока; предел прочности полученных образцов. Установлено, что важную роль в формировании образцов, прочность которых достаточна для транспортировки и переработки, играют процессы, приводящие к изменению распределения тока по сечению образца и его индуктивности во время импульса тока.

В технике все шире используются композитные материалы, в том числе такие, которые состоят из металла и диэлектрика. Предложен целый ряд технологических процессов, в которых для достижения требуемого эффекта на смесь металлических частиц и диэлектрика воздействуют электрическим током большой плотности (электроимпульсное упрочнение прессованных расходных электродов, получение пористых изделий из гранул и порошков, начальная стадия электродуговой плавки коксородной смеси [1–3]). Однако если явления и процессы, возникающие в сплошных проводниках при протекании по ним импульсного электрического тока большой плотности, т. е. тока такой величины и длительности, при которых в проводнике возникают необратимые изменения, исследованы достаточно подробно [4,5], то более общий случай, когда ток большой плотности течет в среде, представляющей собой смесь проводника и диэлектрика только начинает изучаться [1,6,7].

Воздействие электрического тока большой плотности на сплошной проводник может приводить как к заживлению пор и микротрещин, измельчению зерна и увеличению прочности материала; так и к деструкции: накоплению дефектов, разрушению, диспергированию проводника. Протекание тока большой плотности по смеси проводящих и диэлектрических частиц может приводить к возникновению нового эффекта: соединению отдельных проводящих фрагментов между собой и, как следствие, к возникновению прочности и увеличению проводимости материала. При большей плотности тока будет происходить разрушение тонких контактных мостиков, которое приводит к деструкции: к снижению

прочности и проводимости, возникновению "трещин" и даже диспергированию исходных фрагментов.

В настоящей работе исследуются процессы, связанные с протеканием импульсного тока большой плотности по проводящей смеси, состоящей из отдельных частиц металла, пространство между которыми заполнено воздухом, которые приводят к формированию брикетов, прочность которых достаточна для транспортировки и переработки.

Электропроводность смеси пространственно неоднородна, электрическое сопротивление определяется главным образом контактами между частицами металла. Поэтому достаточно короткий импульс электрического тока позволяет вводить энергию в основном в зону контактов между частицами металла. При достаточной величине этой энергии происходит сварка контактов и формируется прочный образец — брикет. При этом разогрев всей массы материала может быть незначительным. Такой процесс, с одной стороны, энергетически выгоден, а с другой стороны, позволяет осуществить брикетирование материалов, которые окисляются при нагреве (например, титановых сплавов).

В качестве исследуемого материала использовалась металлическая стружка, сжатая в диэлектрической прессформе. Этот материал выбран по ряду причин: простота изготовления, дешевизна, широкие и легко осуществимые возможности изменения начальных параметров, позволяющие исследовать процесс электроимпульсного брикетирования.

Стружку сжимают, а затем, не снимая давления, пропускают импульс электрического тока большой плотности, что позволяет связать спрессованную стружку

в брикет. Исходный материал после сжатия (вплоть до давлений  $3-4t \cdot \text{cm}^{-2}$ ) не приобретает механической прочности и после снятия давления рассыпается на исходные фрагменты. Прочные образцы образуются только в результате пропуска электрического тока через материал, предварительно сжатый до заданной плотности [8–11]. Этот процесс может быть полезен, в частности, для металлургии [12,13], где стружка является основным резервом вторичного сырья, а ее использование по действующей технологии сталкивается со значительными трудностями. Кроме того, он может послужить основой для создания новых материалов: фильтров, гетеров, шумо- и радиопоглощающих материалов и т.п. Таким образом, настоящее исследование может представлять интерес как для электрофизики, так и для техники.

Для расчетной оценки прочности образцов в зависимости от величины и длительности пропускаемого электрического тока используем упрощенную модель в соответствии с [6]. Композитный гетерогенный материал представляем в виде решетки сопротивлений (роль сопротивлений играют контакты между кусками проводника, а сами куски играют роль соединяющих проводов) и как сплошную среду с плотностью  $\gamma_c$  и удельным электрическим сопротивлением  $\rho_c$ . Решетка сопротивлений состоит из  $N = (H/h)(\gamma_c/\gamma_m)^{1/3}$  последовательных слоев, в каждом из которых  $M = (S/s)(\gamma_c/\gamma_m)^{2/3}$  параллельных контактов ( $H$  — длина образца;  $h$  — средняя толщина кусков проводника;  $S$  — площадь сечения образца;  $s$  — средняя площадь куска проводника, приходящаяся на один контакт;  $\gamma_m$  — плотность металла). Полагаем, что сопротивление контакта — это сопротивление области стягивания тока  $r = \rho_m/a$ , где  $a$  — диаметр металлического контакта [14],  $\rho_m$  — удельное электрическое сопротивление металла. Тогда средний размер контакта  $a_0$  можно вычислить исходя из измеренного удельного сопротивления сжатой стружки  $\rho_c$  и металла  $\rho_m$ . Полагаем для простоты, что контакты равномерно распределены по размерам от 0 до  $2a_0$ .

Для того чтобы исключить разогрев всего образца, длительность импульса тока должна быть меньше, чем время диффузии тепла за счет теплопроводности. Уменьшение длительности импульса тока приводит к возникновению скин-эффекта, при дальнейшем его уменьшении толщина скин-слоя уменьшается и, если она становится близка к размерам частиц металла, рассматриваемая модель неприменима. Таким образом, длительность импульса тока  $\tau$  задается следующим соотношением:

$$\frac{30\mu\mu_0h^2}{\rho_c} \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_c}\right)^{2/3} < \tau < \frac{a_0^2c\gamma_m}{10k}, \quad (1)$$

$\mu$  — магнитная проницаемость образца,  $c$  — теплоемкость металла,  $k$  — коэффициент теплопроводности металла.

При нагреве металла в контакте до температуры, большей, чем половина температуры его плавления

(удельная введенная энергия  $e_1$ ), происходит сварка контакта благодаря увеличению пластичности металла за счет внешнего давления, электростатического притяжения контактов и давления, возникающего при расширении нагретого металла. Если энергии, выделяющейся в контакте, достаточно для плавления металла (удельная введенная энергия  $e_2$ ), то произойдет разрушение контакта вследствие развития магнитогиродинамической неустойчивости.

Удельная энергия, вкладываемая в контакт, уменьшается с ростом его размеров, поэтому, если эта модель справедлива, при пропускании тока контакты малого размера ( $a < a_2$ ) расплавляются и разрушаются, более крупные ( $a_2 < a < a_1$ ) становятся пластичными, свариваются и формируют прочность образца, а еще большие ( $a > a_1$ ) остаются без существенных изменений. Размеры  $a_{1,2}$  можно вычислить, если приравнять энергию, выделяющуюся в контакте при пропускании тока, к энергии, необходимой для нагрева или плавления материала контакта,

$$a_{1,2} = \left( \frac{h^2}{e_{1,2}H^2\gamma_m^{1/3}\gamma_c^{2/3}} \int_0^\tau \frac{U^2(t)}{\rho_m(t)} dt \right)^{1/2},$$

$U(t)$  — напряжение на образце,  $H$  — длина образца.

Прочность получаемого образца  $Q$  (максимальная величина нагрузки при разрыве) или ее отсутствие определяются двумя факторами: прессованием и электрической сваркой контактов. В результате электрической сварки контактов создается сила сопротивления разрыву  $Q_i$ . В качестве оценки для этой величины можно взять суммарную прочность всех сваренных контактов в сечении проводника, т.е. произведение числа контактов ( $M$ ) на их площадь ( $a^2$ ) и на предел прочности контакта  $q$  (формируемый контакт сходен с контактом, создаваемым при точечной или рельефной электросварке, прочность которого может достигать 90% от прочности металла, при расчетах принималось  $q \sim 0.5$  предела прочности металла). Учитывая распределение контактов по размерам ( $f(a)$  — функция распределения контактов по размерам;  $f(a) = 1/2a_0$ , при  $a < 2a_0$ ,  $f(a) = 0$  в остальном диапазоне), получаем

$$Q_i = \int_{a_2}^{a_1} mqSa^2f(a)da = \frac{qS\gamma_c^{2/3}(a_M^3 - a_2^3)}{6sa_0\gamma_m^{2/3}}.$$

Суммируется прочность всех сваренных контактов от минимального  $a_2$  до максимального  $a_M$ . В качестве  $a_M$  выступает либо  $a_1$  — наибольший контакт, который может быть сварен (если  $a_1 < 2a_0$ ), либо  $2a_0$  — наибольший контакт, который существует в образце (если  $a_1 > 2a_0$ ).

Как известно [12,15], при больших давлениях прессования ( $300-900 \text{ MN/m}^2$  в зависимости от материала и характера стружки), которые обеспечивают сжатие стружки до плотности  $\gamma_c > 0.5\gamma_m$ , могут формироваться

Результаты испытаний образцов на разрыв при статическом одноосевом нагружении

$U_b, V$	$E, kJ$	Группа 12 ( $\gamma_c = 0.5 \text{ g/cm}^3, W = 170 \text{ g}, P = 700 \text{ kN/m}^2$ )			Группа 16 ( $\gamma_c = 0.75 \text{ g/cm}^3, W = 200 \text{ g}, P = 1400 \text{ kN/m}^2$ )			Группа 18 ( $\gamma_c = 0.8 \text{ g/cm}^3, W = 250 \text{ g}, P = 1800 \text{ kN/m}^2$ )			Группа 25 ( $\gamma_c = 1.1 \text{ g/cm}^3, W = 250 \text{ g}, P = 6000 \text{ kN/m}^2$ )		
		Прочность образцов			Прочность образцов			Прочность образцов			Прочность образцов		
		Расчет, N	Опыт		Расчет, N	Опыт		Расчет, N	Опыт		Расчет, N	Опыт	
			N	kN/m <sup>2</sup>		N	kN/m <sup>2</sup>		N	kN/m <sup>2</sup>		N	kN/m <sup>2</sup>
250	0.48	-140	*										
300	0.68	-5	**										
500	1.9	110	35	16	-88	*		-1260	*				
1000	7.5	400	30	14	1290	170	77	-750	15	7	-170	**	
1500	17		190	86	1480	350	160	550	420	190	-134	5	
2000	30	410	180	82	2010	450	200	2030	540	240	5200	360	
2500	47	1500	310	140				3890	>1140	>510	8100	940	
3000	68	1250	110	50	1520	>450	>200						
3500	92	1370	>260	>120									
4000	120	6	**										

\* — прочный образец не сформирован (извлекается стружка), \*\* — образец сформирован не по всему объему (извлекаются куски и стружка),  $W$  — вес брикета.

прочные брикеты, в этом случае обработка электрическим током может дополнительно увеличить прочность брикетов. При меньших давлениях прессования за счет упругости стружки (в том случае если образец сварен электрическим током) в нем сохраняются остаточные упругие напряжения, которые облегчают разрушение проводника. Таким образом, силу, возникающую в образце в результате прессования, можно грубо принять  $Q_c \sim 0.5PS(\gamma_c/\gamma_m - 0.5)$ , где  $P$  — усилие прессования,  $S$  — площадь сечения образца. Таким образом,

$$Q = Q_c + Q_i. \quad (2)$$

Согласно этой модели, следует ожидать, что при малой амплитуде импульса тока прочные образцы не формируются. При увеличении тока растут размеры и прочность свариваемых контактов; когда их суммарная прочность превысит остаточные упругие напряжения, начинают формироваться брикеты. При дальнейшем росте тока прочность брикетов растет до тех пор, пока выполняется условие  $a_1 < 2a_0$ , затем прочность брикетов снижается, так как размеры свариваемых контактов более не растут, а разрушаются все более крупные контакты.

Расчеты, выполненные на основе разработанной модели, позволили оценить необходимые параметры экспериментальной установки. Экспериментальная установка состояла из ручного пресса с усилием до 2 т, фарфоровой прессформы и источника импульсного электрического тока (конденсаторная батарея  $C = 15 \text{ mF}$ ,  $U_{\max} = 5 \text{ kV}$ ,  $E_{\max} = 200 \text{ kJ}$ ), который позволял получать в низкоомной нагрузке ( $\sim 0.001 \Omega$ ) импульсы тока длительностью 250  $\mu\text{s}$  с амплитудой до 500 кА.

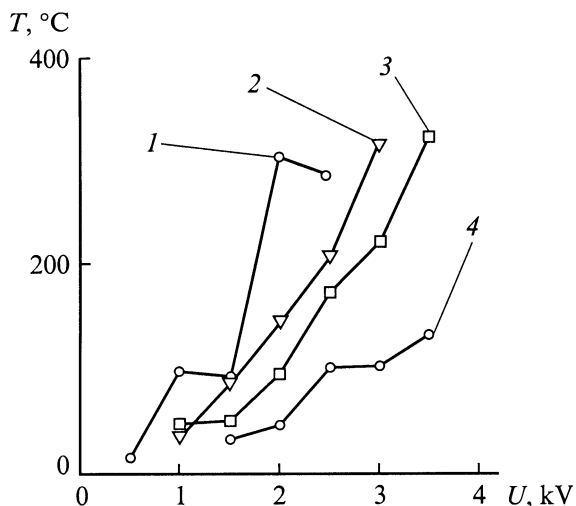
В первых опытах [8,9] подтверждена возможность получения прочных образцов — брикетов из металлической стружки разных металлов и сплавов, различного

вида и качества, а также возможность использования этого процесса в металлургии.

В настоящей работе исследовались 4 группы образцов из титановой стружки. Стружка титанового сплава 3М состояла из кусков разного размера с усредненными параметрами  $l \sim 30 \text{ mm}$ ,  $b \sim 5 \text{ mm}$ ,  $h \sim 1 \text{ mm}$ . Группы отличались по плотности, до которой сжимался исходный материал. Первая группа 12 имела плотность  $0.5 \text{ g/cm}^3$  (12% Ti, остальное воздух), которая близка к насыпной плотности стружки, следующие группы: 16 —  $0.75 \text{ g/cm}^3$  (16% Ti), 18 —  $0.8 \text{ g/cm}^3$  (18% Ti), 25 —  $1.1 \text{ g/cm}^3$  (25% Ti). Диаметр образцов 50 мм, длина 100–140 мм. Величина пропускаемого через образец тока регулировалась путем изменения зарядного напряжения конденсаторной батареи  $U_b$ . Эксперименты осуществлены при зарядном напряжении батареи 250, 300, 500, 1000, 1500, ..., 4000 V. В каждом опыте регистрировались осциллограммы тока и напряжения на образце, электрическое сопротивление образца до и после пропускания электрического тока, температура образца после пропускания тока; затем образцы испытывались на разрыв и измерялась максимальная нагрузка при разрыве.

Испытания образцов на разрыв проводились при одноосевом статическом нагружении на разрывной машине РД-05. Были изготовлены хомуты, которые позволили не сминать брикеты при их установке в захваты машины. Такие захваты позволили разрушать образцы при нагрузке до 500 N, более прочные образцы из захватов выскальзывали. Разрушение происходило не в зоне захватов, хотя концентраторы не использовались. Результаты опытов сведены в таблицу.

Для каждой партии в первой графе таблицы приведены расчетные значения нагрузки при разрыве. Расчет прово-



**Рис. 1.** Зависимость температуры образцов  $T$  от параметров обработки (зарядного напряжения батареи  $U_b$ ): 1 — плотность образцов 0.5 (12% металла), 2 — 0.75 (16% металла), 3 — 0.8 (18% металла), 4 — 1.1  $\text{g/cm}^3$  (25% металла).

дился по разработанной оценочной модели. В следующих графах приведены нагрузка при разрыве образцов на разрывной машине и предел прочности. Из таблицы видно, что процесс формирования механической прочности образцов импульсным электрическим током носит пороговый характер. При малом зарядном напряжении батареи (и соответственно при малом токе) формирования брикетов не происходит, при большем напряжении образуются брикеты с малой прочностью, при дальнейшем увеличении напряжения прочность брикетов резко возрастает и затем в широком диапазоне изменения величины пропускаемого тока растет медленно. Падение прочности, согласно расчетам, должно происходить при токах (напряжениях батареи), больших, чем те, которые использовались в эксперименте. В опытах оно также не зарегистрировано; исключение представляет "точка" 12–4000 V, в которой и расчет и опыт дают падение прочности.

Результаты прочностных испытаний образцов показывают, что обработка импульсным электрическим током позволяет получать прочные брикеты разной плотности. Расчет правильно отражает начало процесса формирования механической прочности образцов, однако расчетная величина прочности завышена, это, по-видимому, связано с тем, что в расчетной модели суммируется прочность всех сварочных точек, а реально они во время испытаний нагружаются неодновременно. С ростом плотности композитной смеси энергия, необходимая для получения прочных образцов, возрастает.

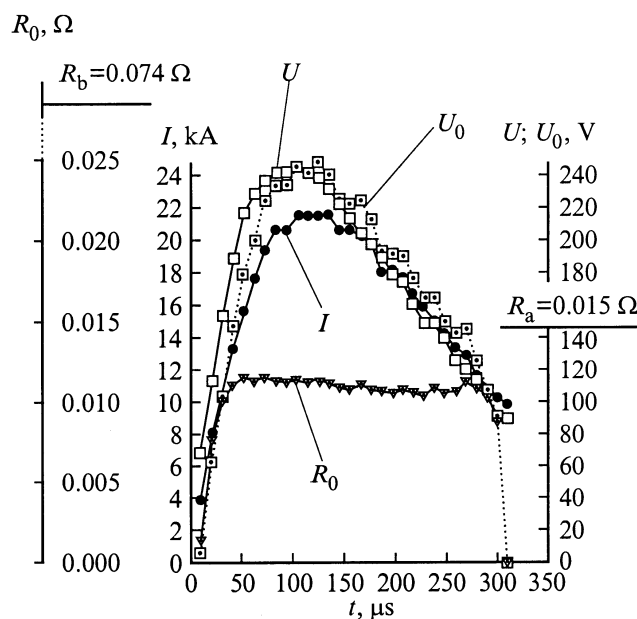
Результаты измерения электрического сопротивления образца до и после обработки его током показывают, что конечное сопротивление образца существенно (в 2 раза) меньше начального как для брикетов, так и для образцов,

которые рассыпаются после снятия давления. Зависимости конечного сопротивления от величины зарядного напряжения батареи и амплитуды импульса тока не наблюдается.

Результаты измерения усредненной по объему температуры образцов представлены на рис. 1. Температура измерялась термопарой через 2 min после пропуска тока, а затем экстраполировалась к моменту окончания импульса тока. Из графиков видно, что в описываемых опытах образцы малой плотности нагреваются не более чем на  $400^\circ$ , а более плотные — не более чем на  $200^\circ$ . Это согласуется с величиной энергии, вложенной в нагрузку, которая рассчитывалась по осциллограммам тока, а также с внешним видом образцов. Эти данные согласуются также с результатами работ, в которых выполнен химический анализ металла брикетов [7,8]. Полученный результат согласуется с предлагаемой моделью процесса.

На рис. 2–4 приведены характерные осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$  на образце для партии 12. Здесь же приведены напряжение  $U_0$ , которое отражает процессы, происходящие внутри образца  $U_0 = U - L_{\text{out}}dI/dt$ , где  $L_{\text{out}}$  — часть индуктивности образца, связанная с созданием магнитного поля вне образца ( $L_{\text{out}}$  рассчитывалась исходя из размеров образца и по осциллограммам тока и напряжения на металлической трубке), а также  $R_0 = U_0/I$ . Указаны значения сопротивления сжатого образца до пропуска тока  $R_b$  и после пропуска тока  $R_a$ .

Форма осциллограмм тока определяется комплексным сопротивлением всего разрядного контура. Осциллограммы напряжения более чувствительны к процессам,



**Рис. 2.**  $U_b = 500$  V, прочность отсутствует, извлекаемый образец рассыпается.

происходящим в образце, и представляют наибольший интерес.

При малом зарядном напряжении батареи 250–500 В (рис. 2) осциллограммы напряжения на образце повторяют осциллограммы тока, а сопротивление образца  $R_0$  практически не меняется в процессе пропускания тока.

При увеличении зарядного напряжения (до 1000–1500 В) характер осциллограммы напряжения на образце меняется (рис. 3). Скачком достигнув величины 500–600 В, напряжение перестает расти, хотя ток продолжает нарастать, т.е. формируется плоская вершина, после которой следует резкий спад напряжения. При дальнейшем увеличении зарядного напряжения батареи (от 1000 до 4000 В) амплитуда и длительность плоской вершины импульса напряжения практически не меняется, а амплитуда обратного выброса напряжения резко возрастает (рис. 4). Сопротивление образца  $R_0$  не остается постоянным, при этом в течение всего времени протекания тока оно остается существенно меньше начального сопротивления образца  $R_b$ , а в конце первого полупериода импульса тока достигает значения, близкого к конечному сопротивлению образца, измеренному после пропускания тока  $R_a$ .

Осциллограммы, полученные при пропускании тока через материал, сжатый до большей плотности, имеют примерно такой же вид. Отличие состоит лишь в том, что амплитуда обратного выброса напряжения при увеличении плотности образца уменьшается.

Изменение характера осциллограмм происходит при том же зарядном напряжении, при котором начинает формироваться механическая прочность образца. Таким образом, экспериментальные результаты позволяют подтвердить исходные предположения о процессах, которые приводят к формированию механической прочности образца и несколько развить их.

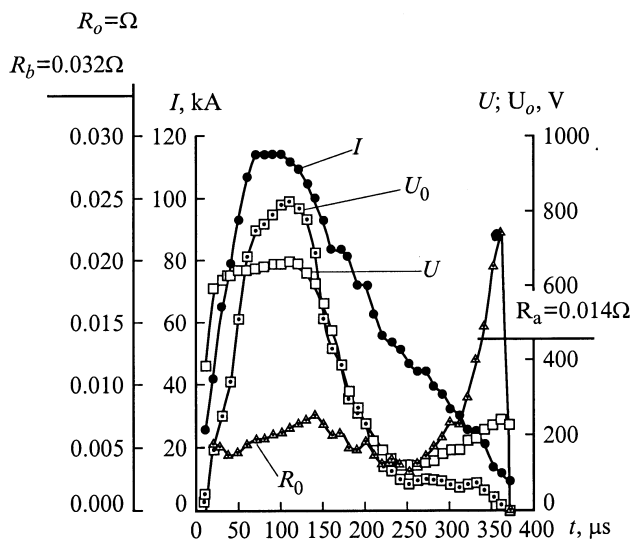


Рис. 3.  $U_b = 1500$  В, нагрузка при разрыве 190 Н.

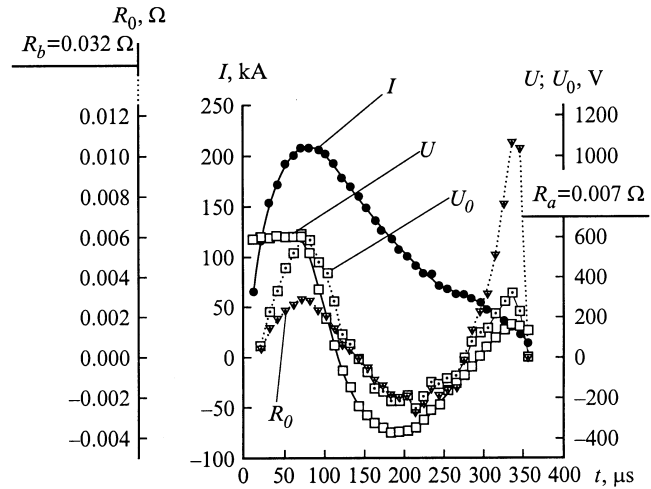


Рис. 4.  $U_b = 2500$  В, нагрузка при разрыве 310 Н.

При подаче напряжения на образец за короткое время (менее нескольких микросекунд) происходит пробой тонких окисных пленок как по краям существующих *a*-пятен, так, возможно, и вне их. В результате сопротивление образца падает. Весь наблюдаемый процесс развивается уже в этой проводящей системе.

Если напряжение на образце мало, выделяющаяся в контактах энергия достаточна для разрушения лишь небольшого числа мелких контактов и для размягчения и упрочнения небольшого числа более крупных контактов это не приводит к дальнейшему существенному изменению сопротивления образца или заметному его упрочнению. После прекращения тока окисная пленка частично восстанавливается, часть контактов разрушается, в результате величина сопротивления образца возрастает ( $R_b > R_a > R_0$ ).

Если напряжение на слое металла и соответственно величина тока через каждый контакт (контактное *a*-пятно) больше некоторого, то разрушение контакта и соответственно перераспределение тока на другие соседние контакты вызывают лавинообразное разрушение мелких контактов. В результате ток, протекающий по проводнику, перераспределяется и течет через оставшиеся крупные контакты, проводимость которых возрастает из-за размягчения и развития контактной поверхности. Происходит переход от протекания тока по сплошной среде к протеканию значительной его части по отдельным каналам. При этом существенно возрастает индуктивность образца, рост индуктивности формирующихся каналов протекания тока лимитирует скорость процесса перераспределения тока.

Таким образом, для формирования образцов из смеси отдельных металлических частиц и диэлектрика при пропускании по ним коротких импульсов электрического тока большой плотности важны процессы перераспределения тока.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда технологического развития (договор № 149/97 от 12.04.98) и ФЦП "Интеграция" (проект КО854).

## Список литературы

- [1] *Pakhomov A.V., Peregud B.P., Sarychev A.K., Vinogradov A.P.* // Mat. Rec. Sos. Proc. 1990. Vol. 195. P. 217–222.
- [2] *Гегузин Я.Е.* Физика спекания. М.: Наука, 1984. 311 с.
- [3] Электротермическое оборудование. Справочник / Под ред. А.П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980. 416 с.
- [4] *Абрамова К.Б., Златин Н.А., Перегуд Б.П.* // ЖЭТФ. 1975. Т. 9. Вып. 6. С. 2007–2022.
- [5] *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоиздат, 1990. 289 с.
- [6] *Дульнев Т.Н.* // ИФЖ. 1981. Т. 41. № 1. С. 172–184.
- [7] *Баранов С.А.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 7. С. 128, 129.
- [8] *Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Филин Ю.А.* Патент РФ. № 2063304. 1994. БИ. 1996. № 19.
- [9] *Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Филин Ю.А.* // Цветные металлы. 1998. № 12. С. 70–74.
- [10] *Abramova K.B., Samujlov S.D., Filin Yu.A.* // The 9<sup>th</sup> World Conf. on Titanium. Abstract booklet. Sankt-Petersburg, 1999. S8-49.
- [11] *Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Антипов В.В.* и др. // Докл. IV Всероссийской научно-практической конф. с международным участием "Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности" / Под ред. Н.И. Иванова. Санкт-Петербург, 1999. Т. 2. С. 57–64.
- [12] *Тамуров В.П., Ярошевский С.М., Левин М.И., Рудевский С.Г.* Оборудование по переработке вторичных черных металлов. М.: Metallurgy, 1976. 288 с.
- [13] *Сергеев В.В., Безукладников А.Б., Мальшин В.М.* Metallurgy титана. М.: Metallurgy, 1979. 264 с.
- [14] *Хольм Р.* Электрические контакты. М., 1961. 464 с.
- [15] *Скворцов Ю.Н., Морозов Е.И., Усов В.Н.* // Технология легких сплавов. 1971. № 5. С. 112.