

УДК 623.4.082.6+532.52+533.95

ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ ПРИ ПРОПУСКАНИИ ПО НИМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Г. А. Швецов, А. Д. Матросов, А. В. Бабкин*, С. В. Ладов*, С. В. Федоров*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

* Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 107005 Москва

Приведены результаты экспериментального и численного исследований разрушения металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока. Экспериментальные результаты представлены в виде рентгенограмм кумулятивных струй без тока и с током и таблиц глубин каверн в преградах. Численное моделирование разрушения кумулятивных струй с током проведено для трех возможных механизмов разрушения (развитие МГД-неустойчивости кумулятивных струй, объемное разрушение, одновременное развитие МГД-неустойчивости и объемное разрушение). Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Введение. В последние годы опубликовано несколько работ по изучению воздействия импульсного электрического тока на металлические кумулятивные струи (КС) (см., например, [1–3]). Экспериментально и теоретически показано, что воздействие электрического тока вызывает существенное изменение “структуры” струи и уменьшение времени ее разрушения, что в свою очередь приводит к уменьшению глубины каверны в преграде в несколько раз. Этот эффект представляет большой практический интерес. Механизмы разрушения КС импульсным током и их влияние на глубину проникания КС в преграду в настоящее время изучены недостаточно. В данной работе приведены результаты экспериментального и численного исследований разрушения КС электрическим током.

Численное моделирование проведено для трех возможных механизмов разрушения: а) развитие МГД-неустойчивости КС; б) объемное разрушение; в) одновременное развитие МГД-неустойчивости и объемное разрушение.

Численно моделировался процесс образования, растяжения и пробития КС без воздействия и при воздействии на КС электрического тока.

Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными о структуре КС и глубине их проникания в стальные и алюминиевые преграды при различных параметрах электрического импульса.

Схема экспериментов. Принципиальные схемы экспериментов приведены на рис. 1, а, б (1 — кумулятивный заряд (КЗ), 2 — источник электромагнитной энергии, 3 — электроды, 4 — индуктивные датчики для измерения тока и производной тока разряда, 5 — места рентгеновской съемки КС (в алюминиевой преграде и в свободном полете), 6 — преграда). Отличие схемы на рис. 1, б от схемы на рис. 1, а заключается в том, что в ней ток может протекать по струе и в процессе ее внедрения в преграду. Образующаяся в преграде каверна может являться обратным токопроводом. В этом случае время воздействия тока на элемент струи намного больше, чем в схеме, изображенной на рис. 1, а. Опыты проводились с КЗ калибром 50 и 100 мм со стальными и алюминиевыми преградами. В качестве источника энергии в экспериментах использовалась конденсаторная батарея с зарядным напряжением до 5 кВ и емкостью до 20 мФ. Ток по КС начинал протекать с момента за-

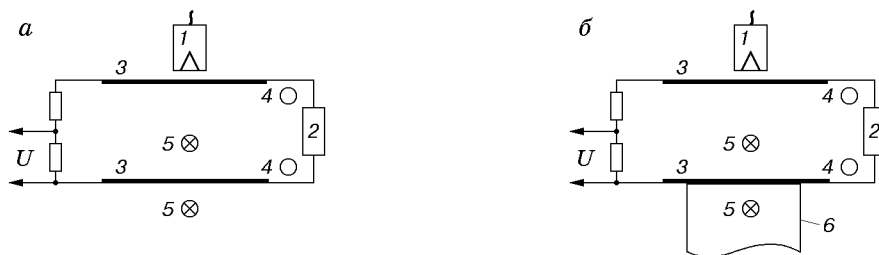


Рис. 1

мыкания электродов струей. В экспериментах изменялись ток, производная тока разряда ($100 \div 500$ кА, $3 \cdot 10^9 \div 10^{11}$ А/с), продолжительность электрического импульса, время воздействия на различные элементы струи и другие параметры. Рентгенографирование КС осуществлялось в свободном полете и в преграде (алюминий). Влияние воздействия электрического тока на КС дополнительно отслеживалось по глубине проникания струи в преграду.

Результаты экспериментов. На рис. 2 приведены рентгенограммы двух опытов, проведенных с алюминиевой преградой по схеме, изображенной на рис. 1, б, с КЗ калибром 50 мм при $t = 52,5$ мкс (а — эксперимент без тока, б — эксперимент с током (450 кА)). Видно, что в эксперименте с током струя разрушилась на отдельные фрагменты. Разрушение произошло внутри каверны.

На рис. 3, а, в приведены рентгенограммы струи с током и без тока соответственно при $t = 52,5$ мкс. Эксперименты проведены по схеме, представленной на рис. 1, а, с КЗ калибром 50 мм. На рис. 3, в в увеличенном масштабе приведен фрагмент КС перед нижним электродом, показанной на рис. 3, б. На рентгенограммах виден процесс зарождения и развития перетяжек. После прохождения нижнего электрода струя распадается на отдельные фрагменты с размерами в аксиальном направлении, примерно равными 1–3 диаметрам струи. Фрагменты расширяются в радиальном направлении, достигая 5–10 диаметров струи в тех же сечениях, что и в экспериментах без тока. На рис. 4 приведены рентгенограммы струй от КЗ калибром 100 мм при $t = 108,5$ мкс (а — эксперимент без тока, б — эксперимент с током). Картина разрушения КС зарядами калибром 50 и 100 мм одна и та же (см. рис. 2–4).

На рентгенограммах видно, что разрушение сопровождается развитием МГД-неустойчивости и объемным разрушением материала КС после прохождения струей нижнего электрода. Анализ рентгенограмм показывает, что количество перетяжек в струе без тока и количество фрагментов в экспериментах с током примерно одинаково.

КС в преграде (см. рис. 2, б) разрушилась на отдельные фрагменты позже, чем струя в эксперименте без преграды (см. рис. 3). В КС в преграде при одной и той же величине тока объемного разрушения практически не происходит.

На рис. 2, 3 отчетливо видны дискообразные фрагменты КС после разрушения.

Разрушение КС при пропускании по ним электрического тока приводит к уменьшению глубины каверны в преграде в несколько раз. Этим процессом можно управлять, меняя амплитуду тока, время его нарастания и продолжительность электрического импульса.

В проведенных экспериментах с КЗ калибром 50 мм токовая неустойчивость успевала развиваться и глубина проникания струи начинала уменьшаться, если ток и производная тока превышают значения 10^5 А и $3 \cdot 10^9$ А/с соответственно.

Моделирование воздействия электрического тока на кумулятивную струю. Моделирование проводилось с помощью двух физико-математических моделей (модели объемного разрушения и модели развития МГД-неустойчивости), реализованных в рам-

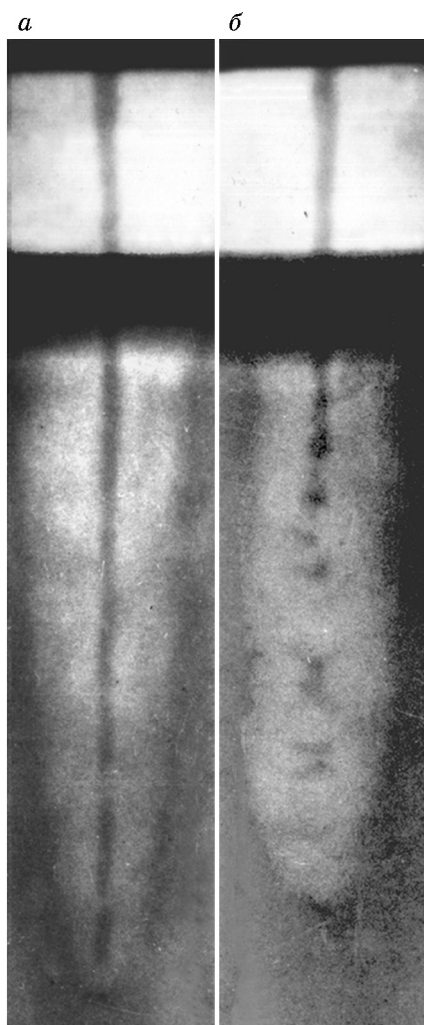


Рис. 2

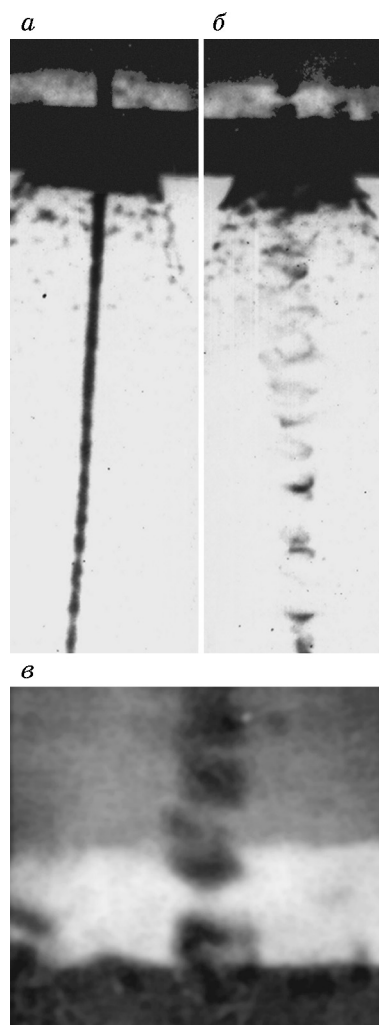


Рис. 3

ках численного решения квазидвумерных нестационарных задач динамического деформирования высокоградиентного проводящего термически разупрочняющегося стержня при заданном законе изменения во времени протекающего по нему полного тока.

Объемное разрушение КС изучалось на модели цилиндрического сжимаемого упругопластического стержня в предположении отсутствия шейкообразования на элементах КС [3].

Из численных расчетов по модели объемного разрушения следует, что при совместном термическом и механическом действии тока на элементы КС с характерными для такого рода воздействия параметрами создаются условия для ее объемного разрушения, в результате которого происходит радиальное расширение материала струи, выходящей из области электродной системы. Радиальное расширение струи ведет к уменьшению средней плотности материала элементов КС и должно оказывать влияние на ее пробивную способность. Предпосылки для объемного разрушения создаются в процессе движения элементов КС в межэлектродном промежутке вследствие существенного нагрева и термического разупрочнения материала при одновременном сжимающем действии электромагнитных сил. Реализуется объемное разрушение при выходе элемента КС из межэлектродного промежутка из-за исчезновения сжимающего действия электромагнитных сил с последующими радиальной разгрузкой, потерей сплошности и способности сопротивляться дальнейшему

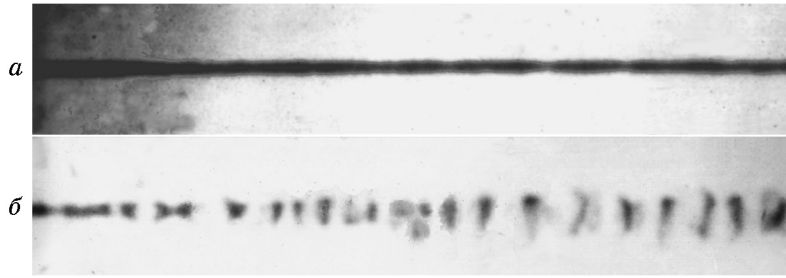


Рис. 4

деформированию, что приводит к рассеиванию материала элементов КС в радиальном направлении с определенной скоростью наружной поверхности.

Исследование развития МГД-неустойчивости проводилось с помощью модели, в которой элементы КС рассматривались как участки несжимаемого жесткопластического осесимметричного стержня переменного сечения без учета объемного разрушения материала. В основе этой модели лежит гипотеза плоских сечений — предположение о том, что частицы струи в каждом поперечном сечении в любой момент имеют одинаковую осевую скорость. Основанием для данной гипотезы послужили результаты, полученные при решении двумерной осесимметричной задачи деформирования упругопластической струи в отсутствие каких-либо воздействий [4]. Принятая гипотеза позволяет описать процесс деформирования струи в рамках одномерной задачи. Плотность тока j в рассматриваемой модели предполагалась распределенной равномерно по сечениям, а силовое действие тока учитывалось заданием давления магнитного поля.

В начальный момент на поверхности элемента КС задавались малые гармонические возмущения, эволюция которых с течением времени определялась в ходе решения задачи. С использованием данной модели для случаев “чисто механического” (в отсутствие токовых воздействий) процесса естественного развития поверхностных возмущений на деформирующейся КС получены результаты, близкие к получаемым с помощью более сложных моделей [4].

Изменение параметров движения и состояния элемента КС описывалось системой уравнений, выражающих законы сохранения импульса, массы и энергии соответственно:

$$\frac{1}{2} \rho_0 R^2 \frac{du_z}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \int_0^R \sigma_z r dr + p_m R \frac{\partial R}{\partial z}, \quad \frac{dR}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{\partial u_z}{\partial z} R,$$

$$R^2 \rho_0 c \frac{dT}{dt} = 2 \int_0^R \eta j^2 r dr + 2 \int_0^R \sigma_T \dot{\epsilon}_i r dr,$$

где z и r — осевая и радиальная координаты, в зависимости от которых изменяются радиус стержня R , осевая скорость u_z , температура T , удельное сопротивление η , интенсивность скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_i$. Удельная теплоемкость c полагалась постоянной. Входящие в закон сохранения импульса осевые напряжения $\sigma_z = \sigma_z(z, r, t)$ определялись на основе физических соотношений несжимаемой жесткопластической среды с учетом граничного условия равенства вектора полного напряжения на боковой поверхности удельной поверхностной силе магнитного давления. Термическое разупрочнение учитывалось зависимостью текущего значения предела текучести σ_T от температуры $\sigma_T = \sigma_{T_0}(T_{\text{пл}} - T)/(T_{\text{пл}} - T_0)$, где T_0 и $T_{\text{пл}}$ — соответственно температуры начальная и плавления.

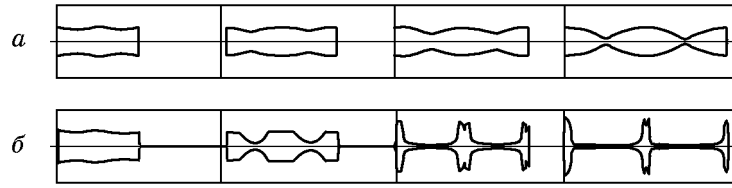


Рис. 5

Для количественного описания результатов токового воздействия на КС и проявления МГД-неустойчивости введены коэффициент формы k_f , коэффициент перераспределения скоростей k_u и коэффициент термического разупрочнения k_σ .

Коэффициент формы характеризует отклонение формы элемента КС от цилиндрической, присущей равномерно растягиваемому элементу длиной l_p и радиусом R_p : $k_f = l/l_p$, где l — некоторая эффективная длина, определяемая из условия $lR_m^2 = l_pR_p^2$; $R_m = \int R^3(z) dz / \int R^2(z) dz$ — средний по массе радиус. Для отдельного элемента КС, образующегося в результате естественного пластического разрушения струи, эффективный коэффициент формы $k_{fe} \approx 0,6$. Для элементов струи с током коэффициент формы уменьшается с увеличением степени дискообразования, в пределе стремясь к нулю. Коэффициент формы k_f позволяет определить эффективную длину элемента КС при расчете пробития КЗ в условиях воздействия электрического тока. С этой целью может быть введен так называемый коэффициент эффективной длины $k_l = 1$ при $k_f \geq k_{fe}$, $k_l = k_f/k_{fe}$ при $k_f \leq k_{fe}$.

Коэффициент перераспределения скоростей $k_u = \dot{\epsilon}_{zm}/\dot{\epsilon}_{zp}$ ($\dot{\epsilon}_{zm} = \int \dot{\epsilon}_z R^2(z) dz / \int R^2(z) dz$ — средний по массе градиент осевой скорости, $\dot{\epsilon}_{zp}$ — градиент осевой скорости равномерно растягиваемого элемента) характеризует перераспределение осевой скорости по длине элемента КС по отношению к случаю равномерного растяжения. В случае естественного деформирования КС вводимый таким образом коэффициент k_u уменьшается по мере растяжения элемента, достигая в момент пластического разрушения и формирования отдельного безградиентного элемента значения $k_u = 0$. Под действием мощного токового импульса коэффициент k_u может принимать отрицательные значения, что характеризует эффект инвертирования распределения скоростей и перехода значительной части материала элемента к деформированию в условиях сжатия в осевом направлении.

Наконец, коэффициент термического разупрочнения k_σ характеризует тепловое действие тока и определяется отношением среднего по массе предела текучести материала к его начальному значению: $k_\sigma = \int \sigma_T R^2(z) dz / [\sigma_{T_0} \int R^2(z) dz]$. Данный коэффициент изменяется в пределах от 1 до 0, принимая значение $k_\sigma = 0$ при достижении материалом температуры плавления.

Как показали расчеты, электрический ток не только ускоряет развитие естественной неустойчивости на КС, приводя к более быстрому ее распаду на отдельные фрагменты, но и при достаточной интенсивности способен вызвать дискообразование. Это следует из представленных на рис. 5 результатов расчетов естественного деформирования одного из элементов средней части КС 50-миллиметрового КЗ (рис. 5,а) и деформирования этого же элемента, подвергнутого воздействию тока длительностью 5 мкс при силе тока 400 кА (рис. 5,б). Дискообразование является следствием перераспределения осевой и радиальной скоростей по длине элемента, вызванного сжатием материала в осевом направлении в

Таблица 1

I_{\max} , кА	t_{\max} , мкс	h , мм				
		Эксперимент	Объемное разрушение	МГД- неустойчивость (Δ)	МГД- неустойчивость (каверна)	МГД-неустойчи- вость и объемное разрушение
250	80	195	200 (+3)	200 (+3)	150 (-23)	200 (+3)
300	40	160	200 (+25)	200 (+25)	131 (-18)	200 (+25)
360	30	147	184 (+25)	200 (+36)	100 (-32)	200 (+36)
350	16	91	132 (+45)	200 (+120)	65 (-29)	98 (+8)
440	17	79	82 (+4)	160 (+103)	54 (-32)	82 (+4)

Таблица 2

I_{\max} , кА	t_{\max} , мкс	h , мм			
		Эксперимент	Объемное разрушение	МГД-неустойчивость (каверна)	МГД-неустойчивость и объемное разрушение
174	34	257	353 (+37)	257 (0)	330 (+28)
227	19	130	353 (+172)	158 (+21)	335 (+158)
366	22	92	164 (+78)	90 (-2)	144 (+57)
430	23	93	176 (+89)	91 (-2)	156 (+68)

областях изначально малых сужений на струе и увеличением радиуса выпуклостей. При этом элементы приобретают форму тонкого диска. Можно отметить, что картина дискообразования, полученная в расчетах, удовлетворительно соответствует картине, полученной в экспериментах.

Расчеты показывают, что МГД-неустойчивость проявляется примерно при тех же параметрах электрического импульса, при которых происходит объемное разрушение. Результаты экспериментов и расчетов глубин каверн в стальной и алюминиевой преградах на основе представленных в данной работе моделей приведены соответственно в табл. 1, 2. Эксперименты проведены по схеме, изображенной на рис. 1, б. Данные в графах I_{\max} и t_{\max} соответствуют максимальным значениям тока и времени его достижения.

Контрольные глубины каверн h_0 в экспериментах без тока в стальной и алюминиевой преграде равны (205 ± 10) и (365 ± 10) мм соответственно. В табл. 1, 2 в скобках приведены отклонения рассчитанных глубин каверн h от экспериментальных значений в процентах для соответствующих моделей разрушения КС. Данные в графе “МГД-неустойчивость (Δ)” соответствуют предположению, что развитие перетяжечной МГД-неустойчивости происходит внутри электродной системы (Δ — расстояние между электродами). В графе “МГД-неустойчивость (каверна)” приведены результаты, полученные в предположении, что развитие перетяжечной МГД-неустойчивости происходит и между электродами, и внутри каверны до соударения элементов КС с дном (рис. 2, б).

На рис. 6 приведены экспериментальные (штриховые линии) и расчетные (сплошные линии) значения глубин каверн h в алюминиевой преграде в зависимости от относительной длины образующей конуса \bar{l} (\bar{l} — отношение текущей длины образующей конуса к начальной) в предположении, что электрический ток протекает по струе в течение всего времени пробивания преграды. Эксперименты проведены по схеме, представленной на рис. 1, б. Кривые 1–4 на рис. 6 соответствуют экспериментальным значениям $h = 257, 130, 92, 93$ из табл. 2. Кривые 5 соответствуют расчету и эксперименту при отсутствии тока в струе.

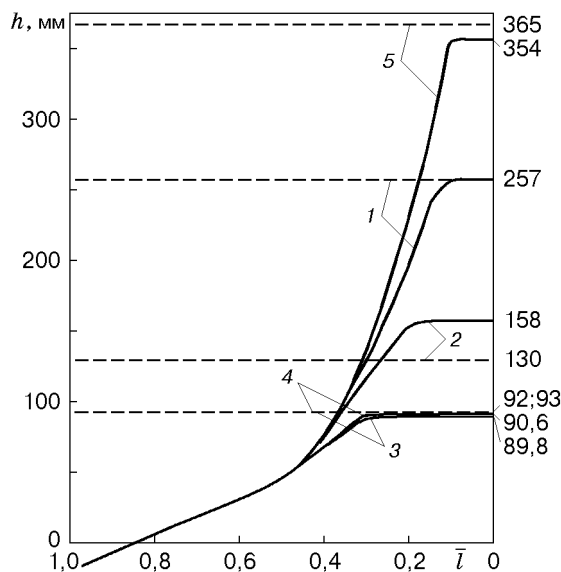


Рис. 6

Выводы. Проведенные эксперименты показали, что при пропускании тока по КС наблюдается как развитие перетяжечной МГД-неустойчивости, так и объемное разрушение КС при выходе элементов КС из электродной системы. Как следует из вычислений, появление того или иного механизма разрушения КС при пропускании по ним электрического тока зависит от условий проведения экспериментов, параметров электрического импульса и времени протекания тока по КС.

Результаты численных расчетов глубин проникания КС в стальную преграду ближе к экспериментальным данным при одновременном учете двух механизмов разрушения КС — развития МГД-неустойчивости и объемного разрушения, а в алюминиевую преграду — в предположении, что развивается только МГД-неустойчивость и ток протекает по струе и при ее движении внутри каверны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shvetsov G. A., Matrosov A. D., Pavlovskii A. I. Current instability of shaped-charge jets // Proc. of the 10th Pulsed power conf., July 3–6, 1995, Albuquerque, USA, 1995. P. 1136–1141.
2. Швецов Г. А., Матросов А. Д. Экспериментальное исследование токовой неустойчивости кумулятивных струй // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения: Тр. VII Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 979–986.
3. Бабкин А. В., Кружков В. А., Ладов С. В. и др. Поведение металлических кумулятивных струй под действием импульса тока // Там же. С. 992–997.
4. Chou P. C., Carleone J. The stability of shaped-charge jets // J. Appl. Phys. 1977. V. 48, N 10. P. 4187–4194.

Поступила в редакцию 22/II 1999 г.