

04;12

## Влияние масштабных эффектов на пинчевой переход высокоскоростного скользящего контакта в дуговую моду

© Э.М. Дробышевский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 19 июня 2000 г.

В рамках представлений о развитии пинчевых МГД неустойчивостей, как основной причине перехода в дуговой режим высокоскоростного скользящего контакта с большим током, определена зависимость скорости разгоняемой в рельсотроне компактной арматуры, достигаемой ею к моменту перехода, от параметров системы и режима разгона. Оказывается, что наибольшее значение скорости перехода пропорционально калибру системы, удельной электропроводности и прочности вещества арматуры и обратно пропорционально средней плотности арматуры.

**1. Введение.** При разгоне в рельсотроне твердой арматуры после начального этапа довольно устойчивой работы скользящего металлического контакта между контактными поверхностями возникает дуга. Запыленная плазма из контактного зазора выбрасывается в канал, что инициирует возникновение здесь шунтирующих дуг за и перед арматурой [1,2]. В результате твердая арматура начинает работать в режиме гибридной арматуры, а весь процесс разгона в течение нескольких микросекунд переходит в низкоэффективную дуговую моду. Однозначным индикатором перехода является скачок напряжения, измеряемого на выходе из канала ( $\Delta U_m \geq 30-60$  V). Наблюдение и анализ перечисленных явлений вместе с изучением поверхностных следов на рельсах и заторможенных после разгона арматурах приводит к выводу, что конечной причиной перехода являются не двумерные явления типа скоростного скин-эффекта (VSE) [3,4] (сам переход, как таковой, от величины скорости не зависит), а трехмерные МГД процессы, типа пинчевания, разыгрывающиеся в зоне контактов [1,2]. Это открытие позволило объяснить давно известное эмпирическое правило, гласящее, что если поджатие арматуры к рельсам превышает "один грамм на

ампер”, переход в дуговую моду не происходит [5]. В таком случае при более или менее стандартных параметрах разгона магнитное давление в районе контактного зазора не превышает давления прижатия арматуры к рельсам или прочности материала арматуры, так что пинчевая перетяжка в зоне контакта не может развиваться. Обнаружение ключевой роли МГД явлений в контактном интерфейсе выявило неадекватность обычно применяемых граничных условий, предполагающих идеальный контакт арматуры с рельсом.

В рамках VSE [3,4] основным параметром, характеризующим переход разгона в дуговую моду, является критическая скорость  $V_c$ , при которой волна плавления, возникающая у задней кромки контактной поверхности арматуры из-за концентрации здесь скинированного электрического тока, достигает передней кромки контакта. При заданной погонной плотности тока в двумерном приближении  $V_c$  является функцией только электрических и термодинамических (ЭТД) параметров арматуры и рельсов [3,4].

Реальный эксперимент трехмерен, и здесь, как минимум, необходимо учитывать возможность затекания тока вперед по боковым поверхностям рельса и арматуры. Это заставляет учитывать зависимость проявления VSE от пространственных параметров системы, в частности от ее калибра. Попытка теоретического осмысления влияния эффектов масштабирования на  $V_c$  с привлечением экспериментальных данных была предпринята Jameses [6,7] в рамках теории VSE. Они нашли, что в общем  $V_c$  должна уменьшаться с ростом калибра системы.

Здесь уместно сказать, что проблема масштабирования процесса разгона в рельсотроне в целом, как в обобщенной электромеханической системе, рассматривалась неоднократно (см., например, [8,9]). Из общих уравнений было найдено, что при изменении калибра в  $K$  раз и при сохранении подобия формы тока и линейной зависимости его силы от  $K$  временной масштаб увеличивается как  $K^2$ , скорость — как  $K$ , а длина ускорителя и масса ускоряемого тела как  $K^3$ . При этом ускорение пропорционально  $K^{-1}$ , а выходная кинетическая энергия метаемой сборки  $\propto K^5$ .

Ниже мы попытаемся, основываясь на новом понимании физики перехода скользящего контакта между твердой арматурой и рельсом в дуговую моду, выяснить, как зависит результирующая скорость перехода  $V_c$  от калибра системы и других типичных для разгона параметров. Это даст возможность целенаправленного поиска условий для достижения

максимально возможного значения  $V_c$  и оптимизации как конструкции метателя, так и процесса бездугового разгона в целом.

**2. Основные постулаты.** Чтобы уловить ведущие тенденции, упростим проблему до предела и примем следующие допущения.

1. Рассматривается монолитная арматура (куб, цилиндр и т.п.), так что ее масса  $m = \rho_a d_0^3$ , где  $d_0$  — калибр рельсотрона (в метрах),  $\rho_a$  — средняя плотность арматуры (далее  $\rho_a = 2700 \text{ kg/m}^3$ ).

2. Примем, что переход в дуговую моду обусловлен пинчевым сжатием арматуры магнитным давлением  $p_B$  в районе ее контактной с рельсом поверхности. Здесь ее прочность ослаблена отсутствием сопротивления сдвигу, т.е. переход начинается, если

$$p_B = B^2/2\mu_0 > s_y, \quad (1)$$

где  $s_y$  — предел прочности материала арматуры (для Al сплавов  $s_y \approx 400 \text{ МПа}$ ). Поскольку напряженность магнитного поля  $B \approx \mu_0 I/2\pi r$ , при  $I = \text{const}$  давление  $p_B$  прогрессивно нарастает с уменьшением радиуса  $r (\leq d_0/2)$  пинчевой перетяжки, что при выполнении условия (1) ведет к ее коллапсу и далее к термическому взрыву и возникновению на ее месте дуги. Здесь  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Н/м}$  — магнитная проницаемость вакуума.

3. Считаем, что толщина  $l$  скин-слоя на боковых поверхностях арматуры растет со временем  $t$  как  $l = (t/\mu_0\sigma)^{1/2}$ , где  $\sigma$  — удельная электропроводность материала арматуры (для Al  $\sigma \approx 10^7 \text{ См/м}$ ).

4. Полный ток, протекающий через арматуру,  $I = \text{const}$ .

5. Поскольку  $\sigma$  в скин-слое падает с ростом температуры из-за джоулева нагрева материала, считаем, что основной ток протекает в веществе под скин-слоем. Это предположение подкрепляется более точными расчетами сходной ситуации, рассмотренной нами ранее (см. рис. 1, а и 2, а в [10]).

6. Считаем далее, что из-за своего нагрева материал в скин-слое имеет прочность существенно меньше прочности материала в холодном теле арматуры.

7. Разгон арматуры идет под действием силы  $F = L'I^2/2$ , так что за время  $t$  она приобретает скорость

$$V = \frac{L'I^2}{2d_0^3\rho_a} t, \quad (2)$$

где  $L'$  — погонная индуктивность рельсов, стандартно  $L' \approx 0.3 \text{ мН/м}$ .

Некоторым уменьшением массы арматуры из-за потери малопрочного нагретого вещества вследствие ГЭД-эффектов [10] пренебрегаем. Считаем также, что сила начального поджатия арматуры рельсами гораздо меньше предела прочности арматуры.

**3. Зависимость скорости перехода в дуговой режим от параметров разгона.** С учетом п. 5–6 получаем, что эффективно  $r \approx (d_0/2) - l$ , так что условие (1) начала пинчевания арматуры в районе ее контакта с рельсами принимает вид

$$\frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2(d_0 - 2l)^2} = \frac{\mu_0}{2\pi^2} \frac{I^2}{d_0^2} \left[ 1 - \frac{2}{d_0} \left( \frac{t}{\mu_0 \sigma} \right)^{1/2} \right]^{-2} \geq s_y. \quad (3)$$

Исключая  $I$  из уравнений (2) и (3), находим значение скорости, при котором происходит пинчевой кризис контакта:

$$V(t) = \pi^2 \frac{L' s_y}{\mu_0 \rho_a} \frac{t}{d_0} \left[ 1 - \frac{2}{d_0} \left( \frac{t}{\mu_0 \sigma} \right)^{1/2} \right]^2. \quad (4)$$

В зависимости от режима ускорения и параметров арматуры, а более точно всей метаемой сборки (сила тока  $I$ ,  $\rho_a$  и т. п.), кризис может наступить при любой скорости, определяемой выражением (4). Максимального значения  $V(t) = V_c$  скорость перехода достигает, когда выражение в квадратных скобках равно  $1/2$ , т. е. при  $t = \tau_0/4 = \mu_0 \sigma d_0^2/16$ , поэтому

$$V_c = \gamma L' \sigma s_y d_0 / \rho_a. \quad (5)$$

Таким образом, критическая скорость перехода компактных арматур прямо пропорциональна калибру. Здесь  $\gamma$  (равно  $\pi^2/256$  при наших предположениях) — нормирующий множитель. При названных выше числовых значениях параметров имеем  $V_c = 68.5 d_0$  km/s. Для достижения этой скорости необходимо в течение времени  $\tau_0/4$  поддерживать ток силой

$$I = \pi d_0 (s_y / 2\mu_0)^{1/2}, \quad (6)$$

что дает поперечную погонную плотность тока  $I/d_0 \approx 40$  MA/m. Отсюда следует, что полученные нами законы масштабирования соответствуют упомянутым выше общим законам масштабирования для электромеханических систем.

**4. Обсуждение и некоторые выводы.** Ясно, что найденная связь  $V_c$  с параметрами арматуры и рельсотрона имеет сугубо оценочный характер. Пока она может служить лишь для грубой ориентации в характере влияния различных факторов на разгон. В дальнейшем полученные зависимости будут неизбежно уточняться путем рафинирования сделанных предположений и учета дополнительных факторов.

Отметим пока следующие очевидные аспекты.

1. Критическая скорость оказывается зависящей от свойств материала арматуры. В этом смысле из всех известных материалов комплекс  $\sigma s_y / \rho_a$  наилучшим оказывается у Be и Al сплавов. Так что найденные ранее чисто опытным путем варианты [11] исчерпывают, по-видимому, все реальные возможности.

2. Совершенно очевидно, что некоторые из сделанных нами предположений довольно грубы. Так, наличие несомой арматурой полезной нагрузки (payload) увеличивает среднюю плотность в формуле (5). С другой стороны, не приняты во внимание потери вещества арматурой вследствие ТЭД-эффектов.

Некоторые факторы, например появление слоя расплава в контактном зазоре или начальное поджатие силой  $f$  арматуры рельсами, нами не учитывались. В принципе поджатие может быть введено в полученные уравнения путем замены  $s_y$  на  $s_y + (f/d_0^2)$  (вспомним здесь упоминавшееся выше правило "1 gf на 1 A").

Ясно, наконец, что локальные особенности и скорость проникновения магнитного поля в тело арматуры существенно зависят от конкретной конфигурации самой арматуры и геометрии сопрягаемых с нею рельсов. Эти особенности, как и неизбежные эффекты VSE, могут быть учтены путем численных 3D расчетов. Из сказанного очевидно, что работа C-образных арматур с контактными хвостовиками, которые прижимаются к рельсам магнитным давлением, потребует в рамках представленного подхода более аккуратного рассмотрения. С этой точки зрения неудивительно, что ряд экспериментов с C-образными арматурами показывает заметно большую величину  $V_c$ , чем это предсказывается формулой (5). Так, мы довели значение  $V_c$  для C-арматуры до 1.33 km/s, что является на сегодня наивысшим значением для систем с  $d_0 = 10$  mm. В [12] на калибре  $d_0 = 25$  mm достигнуто значение  $V_c = 2.2$  km/s. Последнее число, по-видимому, вообще представляет пока наибольшее значение для систем любого калибра.

Сравнение двух приведенных величин скорости в общем подтверждает полученный вывод о пропорциональности скорости перехода калибру системы. При этом оказывается, что не значение  $V_c$  регулирует момент и сам процесс перехода, а, напротив,  $V_c$  является вторичной величиной, зависящей от ряда других, действительно определяющих параметров. Другой вывод, который можно сделать из сравнения, предсказанного формулой (5): значения  $V_c \approx 70d_0$  km/s с приведенными выше экспериментально достигнутыми для  $C$ -арматур величинами, — это то, что в данном случае эффективное значение  $s_y$  (или  $\gamma$ ) в уравнении (5) должно быть увеличено почти вдвое (действительно, давление прижатия любым способом, и в том числе магнитными силами, едва ли может превышать предел прочности материала  $s_y$ ). Все это внушает надежду на возможность существенного повышения скорости перехода и в рельсотронах заметно большего калибра.

Автор благодарен С.И. Розову за ряд ценных советов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 0001 00482.

## Список литературы

- [1] Дробышевский Э.М., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Розов С.И., Белобородый М.В., Латыпов В.Г. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 6. С. 89–94.
- [2] Drobyshevski E.M., Kurakin R.O., Rozov S.I., Zhukov B.G., Beloborodyy M.V., Latypov V.G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V. 32. N 22. P. 2910–2917.
- [3] Parks P.B. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. N 7. P. 3511–3516.
- [4] Woods L.C. // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 1. P. 152–156.
- [5] Marshall R.A. // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 1. P. 125–128.
- [6] James T.E., James D.C. // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 1. P. 86–91.
- [7] James T.E. // IEEE Trans. Magn. 1999. V. 35. N 1 (pt 1). P. 403–408.
- [8] Hsieh K.T., Kim B.K. // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 1. P. 240–244.
- [9] Yun H.D. // IEEE Trans. Magn. 1999. V. 35. N 1 (pt. 1). P. 484–488.
- [10] Дробышевский Э.М., Колесникова Э.Н., Юфеев В.С. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 7. С. 25–32.
- [11] Kirkpatrick D., Haugh D. // IEEE Trans. Magn. 1997. V. 33. N 1. P. 109–114.
- [12] Price J.H., Yun H.D. // IEEE Trans. Magn. 1995. V. 31. N 1. P. 219–224.