

04;12

Роль пинч-эффекта в высокоскоростном металлическом контакте с большим током

© Э.М. Дробышевский, Б.Г. Жуков, Р.О. Куракин, С.И. Розов,
М.В. Белобородый, В.Г. Латыпов

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

Поступило в Редакцию 18 августа 1998 г.

Приведены экспериментальные свидетельства в пользу того, что основным фактором, определяющим течение физических процессов на поверхности раздела твердотельного скользящего контакта, несущего токи $\sim 0.1-1 \text{ MA/cm}^2$, является пинчевая МГД неустойчивость перетяжечного типа. Она приводит к возникновению и взрывному разрушению стягивающихся (квази)жидких перетяжек, соединяющих контактные поверхности, так что скользящие последние относительно друг друга происходит на большей части их площади практически бесконтактно в условиях магнитного подвеса.

Предел ЭМ разгона электропроводящих тел (арматуры) в рельсотроне связан с переходом скользящего твердотельного контакта (СТК) в дуговой режим при $V \sim 1 \text{ km/s}$ [1]. Считается, что нарушение СТК обусловлено плавлением здесь поверхности арматуры с последующим уносом рельсами прилипающего к ним расплава, что создает зазор в СТК. До сих пор рассматривались следующие основные причины плавления поверхности: 1) локальное энерговыделение из-за концентрации тока в малых зонах наилучшего контакта (*a*-пятна) [2], 2) сухое трение [3] и 3) скоростной скин-эффект (ССЭ) [4]. Последний из-за конечной скорости проникновения магнитного поля в рельсы и арматуру ведет по мере роста скорости арматуры к концентрации тока к ее задней кромке, ее плавлению и уносу расплава отсюда. В результате волна плавления смещается по контактной поверхности к передней кромке арматуры, что в итоге разрушает СТК. Описанный ниже эксперимент показывает, что при рельсотронном разгоне тел действует гораздо более эффективный по сравнению с названными механизмом разрушения СТК. Этот механизм — пинч-эффект — обусловлен трехмерностью реальных конфигураций и самой природой амперовых сил, используемых для ЭМ разгона (заметим, что трение можно трактовать одномер-

но, a -пятна — в одно- или двумерном приближении, ССЭ исследуется обычно в плоском приближении).

Чтобы экспериментально выявить эффект в наиболее чистом виде, нами использовалась простейшая арматура в виде алюминиевого кубика с $d_0 = 1$ см. Он ускорялся из состояния покоя в зазоре между двумя T -образными в сечении рельсами. Между тыльной стороной рельсов шириной 28 мм удерживающими стальными плитами находилось оргстекло толщиной 12 мм. Ток за $\sim 25 \mu\text{s}$ нарастал до $I = 550$ кА, оставаясь в течение последующих 150 μs почти постоянным. Заметим для ориентировки, что толщина скин-слоя $l \approx (\tau/\pi\mu_0\sigma)^{1/2}$ за $\tau = 25 \mu\text{s}$ составит в Al ($\sigma = 1.17 \cdot 10^7$ mho/m при $t = 300^\circ\text{C}$) $l_{\text{Al}} \approx 0.6$ мм $\ll d_0$, а в Cu ($\sigma = 2.8 \cdot 10^7$ mho/m при $t = 300^\circ\text{C}$) $l_{\text{Cu}} \approx 0.5$ мм. Тогда магнитное давление, действующее на грани линейного проводника с квадратным сечением с $d = 1$ см, при $I = 550$ кА достигнет $p_B = B^2/2\mu_0 \approx 200$ МПа, а при $d = d_0 - 2l_{\text{Al}} \approx 8$ мм $p_B \approx 240$ МПа. При этом некоторая часть скин-слоя плавится. Сила, ускоряющая кубик в рельсотроне, $F = LI^2/2 \approx 30$ кН (здесь $L' \approx 0.25 \mu\text{H/m}$ — погонная индуктивность рельсов), так что за 150 μs он должен набрать скорость $V \approx 1.7$ км/с, пройдя путь 13 см. Вначале на расстояние $d \approx 1$ см он смещается за $\sim 50 \mu\text{s}$.

Диагностическое значение, важное для понимания процессов в СТК, имеет в данном случае фаза смещения арматуры из положения покоя, когда скорость еще невелика. Здесь мы обратим внимание на две основные особенности, сразу бросающиеся в глаза при рассмотрении рельсов (рис. 1). Во-первых, в местах исходного контакта на обоих рельсах имеются почти квадратные вмятия от кубика на глубину $\Delta \approx 300 \mu\text{m}$. Во-вторых, из углов задней кромки вмятина под углом $42 \pm 2^\circ$ к образующим рельсов идут два сходящихся поверхностных следа, вне которых на рельсах заметны признаки расплавления меди. В местах схождения этих следов имеются округлые углубления. На одном электроде схождение произошло еще в пределах вмятия от кубика, возле его передней кромки и углубление имеет $\varnothing \sim 2.5$ мм. На другом электроде схождение имеет место в $\sim 12-15$ мм за пределами передней кромки следа кубика, но углубления (их два) имеют $\varnothing \approx 0.6-0.8$ мм и расположены в $\sim 7-8$ мм за передней кромкой следа кубика. Вне следа кубика, вниз по его движению вся поверхность электродов имеет многочисленные признаки плавления и эрозии меди.

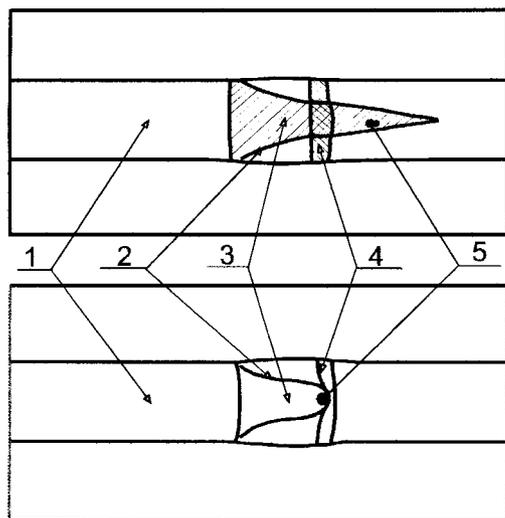


Рис. 1. Схематическое изображение следов на медных рельсах, оставленных Al кубиком, ускоряемым между ними пндеромоторными силами: 1 — рабочая поверхность T-образных рельсов; 2 — сходящиеся следы; 3 — зона, свободная от эрозии, 4 — передняя кромка вмятия; 5 — углубления.

Попытаемся понять причины возникновения двух описанных особенностей. Вмятия на обоих рельсах можно приписать только пинч-эффекту, т.е. осевому расширению кубика вследствие сжатия его боковых граней магнитным давлением p_B . Последнее более чем в пять раз превосходило предел текучести Al $\sigma_{0.2} \approx 30$ МПа. В пользу этого говорит также сопоставление глубины вмятия поверхности рельса при статическом вдавливании кубика с наблюдавшимися значениями Δ (рис. 2) (сопоставление со статическими экспериментами имеет смысл, поскольку расстояние, проходимое в меди звуком за время смещения кубика из исходного положения, гораздо больше толщины рельса). Усилие вмятия кубика в рельсы на глубину $\Delta \approx 300 \mu\text{m}$ как раз соответствует давлению ≈ 200 МПа. Из сказанного следует также, что часто используемая C-образная арматура с целью обеспечения лучшего контакта за счет прижатия ее "хвостов" к рельсам магнитным

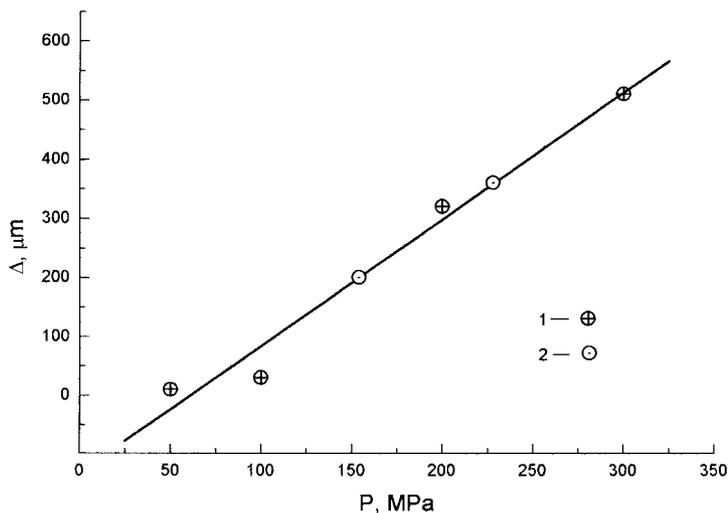


Рис. 2. Зависимость величины вмятия в рельсах Δ от статического давления P , действующего на вминаемый Al кубик — 1; начальные вмятия, созданные в рельсах при ЭМ разгоне кубика — 2.

давлением [1] не имеет особого смысла, так как магнитное давление, как мы видим, и так прижимает арматуру к рельсам за счет всесторонней деформации ее материала.

Действием магнитного давления — пинч-эффектом объясняется также происхождение сходящихся следов на контактных поверхностях рельсов. Дело в том, что на контактных поверхностях арматура/рельс отсутствует сопротивление сдвигу, обусловленное прочностью материала. Как хорошо известно [5], одной из характерных МГД неустойчивостей, присущих легко деформируемым проводникам, несущим ток, является перетяжечная неустойчивость. Она обусловлена возрастанием p_B при уменьшении радиуса проводника ($p_B \sim r^{-2}$).

Наиболее слабым местом в этом смысле оказывается место контакта поверхностей арматуры и рельса. Здесь тонкий (нагретый) слой арматуры начинает прогрессивно сжиматься магнитным полем, скользя вдоль поверхности рельса, так что в конце концов контакт арматура/рельс осуществляется через тонкую металлическую перетяжку. Перемещение

перемычки вдоль рельса под действием силы F в совокупности с процессом утоньшения перетяжки и создает наблюдаемые на рельсах сходящиеся следы. Получается, что значительную часть времени арматура движется по рельсам на "магнитной подушке", тогда как ток течет не через всю исходную контактную поверхность (или ее развитую периферическую часть, если иметь в виду скин-эффект), а через относительно тонкую (и непрерывно утоньшающуюся) перетяжку. В конце концов она взрывается, порождая углубления в рельсе, ток прерывается и металлический контакт вследствие упругого расширения материала арматуры и рельсов снова восстанавливается на большей поверхности. Далее процесс повторяется вплоть до установления полностью дугового режима, например, вследствие уменьшения размеров арматуры из-за ее эрозии. Отметим два обстоятельства: 1) очевидно, что осредненное по времени сопротивление такого контакта с перетяжками должно заметно превышать сопротивление идеального сплошного поверхностного контакта, и 2) изменение свойств реального контакта (появление и развитие перетяжек, флуктуации сопротивления и т.д.) должно модулироваться упругими колебаниями системы и, в первую очередь арматуры. Эти выводы снимают недоумение, высказанное классиком рельсотронного разгона Р. Маршаллом [1] относительно почти двойного превышения напряжения и его флуктуаций на реальном контакте по сравнению с однородным металлическим на стадии, когда рельсы еще не показали следов развитого дугового режима. Он отметил также, что физика явлений на контактных поверхностях в рельсотронах остается пока непонятной.

Представленные выше результаты выявляют причины неадекватности развивавшихся ранее теоретических представлений о причинах перехода СТК в дуговой режим. Существенным оказывается учет эффектов третьего измерения (поперечного относительно канала рельсотрона и протекающего тока). Такой учет существенно расширяет наше понимание процессов на контактных поверхностях, ведущих к катастрофической эрозии последних и разрушению СТК. Возможно, что подавление тем или иным способом перетяжечной МГД неустойчивости в зоне СТК позволит существенно поднять скорость, при которой СТК еще работает надежно.

Работа выполнена при поддержке гранта CRDF RE2-138.

Список литературы

- [1] *Marshall R.A.* // IEEE Trans. Magn. 1995. V. 31. N 1. P. 209–213.
- [2] *Holm R.* // Electric Contacts, Theory and Application. Springer-Verlag, N.Y., 1967.
- [3] *Урюков Б.А., Лебедев А.Д., Милев К.К.* // Материалы 2 Всесоюз. семинара по динамике силовоточного дугового разряда в магнитном поле. Новосибирск, 1991. С. 33–71.
- [4] *Parks P.B.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. N 7. P. 3511–3516.
- [5] *Перегуд Б.П.* // Магнитогидродинамические неустойчивости конденсированных проводников с током. Докт. дис. Л., 1981.