

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
В РЕЛЬСОТРОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Э.М. Д р о б ы ш е в с к и й, С.В. Ю ф е р е в

Электромагнитное метание тел является одним из способов создания экстремально высоких плотностей энергии, применяющимся во многих научных задачах и приложениях [1]. Простейшая конструкция рельсотронного электродинамического ускорителя твердых тел состоит из двух направляющих электродов-рельсов, замкнутых токопроводящей перемычкой. При подведении тока к концам электродов возникает сила, действующая на перемычку и ускоряющая ее. Указанная сила описывается при условии постоянства тока и параметров перемычки довольно простой формулой

$$f = L' I^2 / 2, \quad (1)$$

где L' – погонная индуктивность электродов, I – пропускаемый через них ток, величина которого ограничивается следующими факторами [1–3]:

1. Расплавление поверхности электродов вследствие джоулева тепловыделения и нагрева излучением плазмы в канале ускорителя. При этом необходимо учитывать неоднородности распределения тока по сечению электродов, приводящие к локализации перегрева на рабочей стороне поверхности электродов.

2. Негативное воздействие силы Ампера, расталкивающей параллельные проводники с противоположными токами и измеряемой тоннами на см², что приводит к деформации и разрушению электродов и других элементов конструкции.

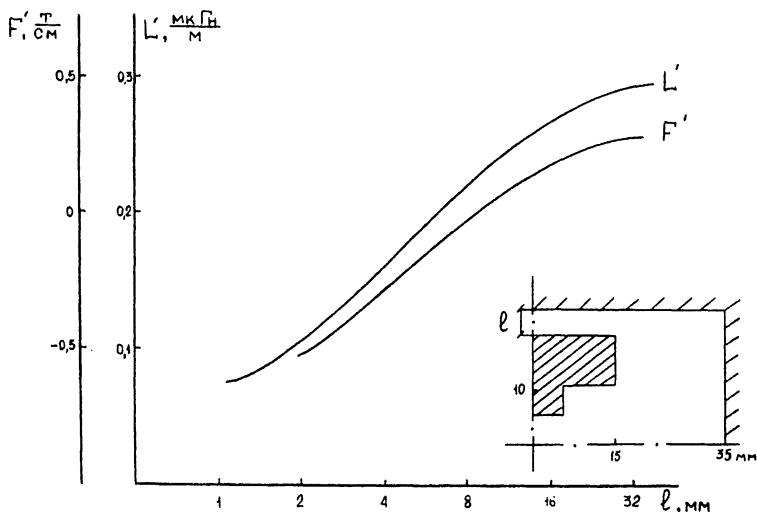


Рис. 1. Изменение погонной индуктивности пары электродов рельсотрона и силы Ампера, действующей на единицу их длины, в зависимости от расстояния между экраном и тыльной стороной поверхности электродов.

Уменьшить влияние указанных факторов возможно путем применения дополнительных токонесущих элементов в конструкции ускорителя, выравнивающих неоднородности распределения тока и компенсирующих силовое взаимодействие [4]. Этих же результатов можно достичь экранированием электродов. Функции электромагнитного экрана, в котором при пропускании основного тока через электроды наводятся вторичные электрические токи, существенно меняющие геометрию и энергетику магнитных полей, могут выполнять конструктивные элементы, служащие для скрепления элементов конструкции ускорителя (containment conductor) [5].

В настоящей работе оптимальное, с точки зрения снижения тепловых и динамических нагрузок на электроды, положение экрана определялось путем расчета параметров поля в системе электроды-экран для рельсотронного ускорителя Лаборатории динамики плотной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН [6] (типичная конфигурация электродов и экрана изображена на рис. 1). Указанный расчет проводился в плоской постановке (приближение бесконечно длинных электродов) с использованием математических моделей и методов, описанных в работе [7].

Известно, что действие экрана сильно меняет распределение тока в скин-слое проводников [8]. Если для неэкранированной пары проводников максимальная плотность тока сосредоточена на их внутренних поверхностях, т.е. на рабочих плоскостях электродов

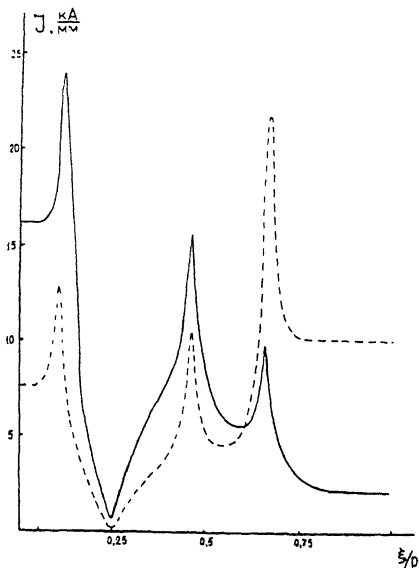


Рис. 2. Распределение линейной плотности тока по половине контура сечения одного электрода для незранированной (непрерывная линия) и экранированной (пунктир) конструкций рельсотрона. Во втором случае расстояние от тыльной стороны электродов до экрана 4 мм.

в случае рельсотрона, то приближение экрана к их тыльной стороне не может перераспределить ток таким образом, что значительная часть его будет протекать уже по тыльным поверхностям (рис. 2). В результате тепловая нагрузка на рабочие поверхности электродов, по которым скользит ускоряемое тело и толкающая его плазма, может быть сильно уменьшена. Для определения оптимального положения экрана введем следующую функцию:

$$\omega_I(l) = J^{max}(\xi, l) / J_{\infty}^{max}(\xi), \quad (2)$$

где l — расстояние между электродом и экраном, ξ — координата контура сечения электродов, $J^{max}(\xi, l)$, $J_{\infty}^{max}(\xi)$ — максимальные значения линейной плотности тока, при которой еще не происходит разрушения материала проводников, на плоскостях электродов с экраном и без экрана соответственно. В работе [7] показано, что для коротких импульсов линейная плотность тока меняется во времени приблизительно пропорционально изменению полного тока через проводник. Поэтому функция ω_I отражает отношение максимально допустимых токов через экранированную и незранированную пары электродов:

$$\omega_I(l) \approx I^{max}(l) / I_{\infty}^{max},$$

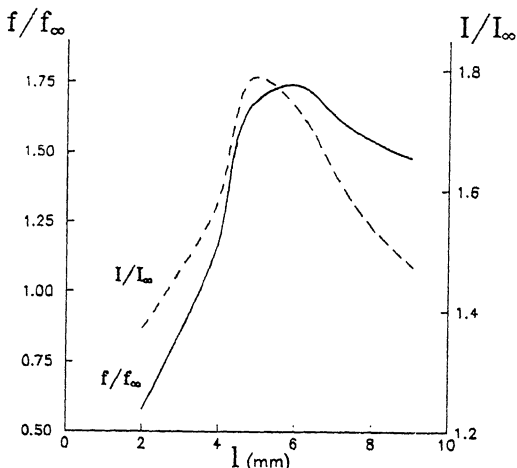


Рис. 3. Отношение максимально допустимых, с точки зрения теплового перегрева поверхности электродов, пропускаемых токов и ускоряющей поршень сил для экранированной и неэкранированной конструкций рельсотрона в зависимости от расстояния между экраном и тыльной стороной поверхности электродов.

На рис. 3 приведен график зависимости $\omega_I(l)$. Хорошо видно, что функция имеет максимум, когда линейная плотность тока на рабочих и тыльных плоскостях примерно одинакова. Однако индуктивность экранированной системы проводников ниже, чем неэкранированной [9], поэтому максимум функции $\omega_I(l)$ смещен относительно максимума функции

$$\omega_F(l) = \frac{f^{max}(l)}{f_{\infty}^{max}} = \frac{L'(l)}{L'_{\infty}} \left(\frac{I^{max}(l)}{I_{\infty}^{max}} \right)^2, \quad (3)$$

которая устанавливает выигрыш в силе, ускоряющей тело. Из рис. 3 видно, что применение экрана для данной конфигурации электродов позволяет увеличить пропускаемый ток и ускоряющую поршень силу приблизительно в 1.8 раза. В наших экспериментах [6, 9] применение экрана позволило увеличить поверхностную плотность тока, приходящуюся на единицу ширины рабочего участка электродов, до $i = 60 \text{ kA/mm}$ без признаков скин-эффекта электродов, что в 1.4 раза превышает наибольшее пороговое значение $i = 43 \text{ kA/mm}$ по данным литературы [1]. При экспериментах с $i > 60 \text{ kA/mm}$ наблюдалось резкое падение эффективности ускорения, что сопровождалось выбросом меди.

Как показали расчеты с использованием формулы (1), величина силы, расталкивающей одиночную пару электродов, лишь в 2 раза меньше силы, ускоряющей тело в рельсотроне, что ведет, как правило, к сильной деформации и разрушению электродов. Однако в реальных конструкциях ситуация может резко измениться – вплоть до противоположной, – наличие экранов существеннейшим образом влияет не только на величину, но и на направление результирующей силы. На рис. 1 представлены зависимости погонной индуктивности L' и силы Ампера F' действующей на единицу электродов, в зависимости от расстояния до экрана. Видно, что при $l \approx 9 \text{ мм}$ действующая на электроды реальной конструкции [6, 9] результирующая сила становится нулевой, а при $l < 9 \text{ мм}$ меняет знак – электроды отталкиваются от экранов, стремясь сблизиться друг с другом, – всю силовую нагрузку через магнитное поле воспринимают конструктивные элементы, выполняющие роль экрана.

Таким образом, оптимальное расположение экранов в рельсотронном ускорителе позволило существенно уменьшить динамические деформации электродов и увеличить пропускаемый через них ток без теплового разрушения их рабочей поверхности.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] H a w k e R.S., B r o o k s A.L., F o w l e r C.M. et al. // AIAA J. 1982. V. 20. P. 978–985.
- [2] D o n a l d s o n A.L., K r i s t i a n s e n M., W a t s o n A. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. V. 22. N° 6. P. 1441–1447.
- [3] Ч и с т я к о в В.П., Ш в е ц о в Г.А. // ПМТФ. 1988. В. 1. С. 20–27.
- [4] B e n o J.H. and W e l d o n W.F. // IEEE Trans. on Magn. 1989. V. 25. N° 1. P. 39–44.
- [5] A u t o n J.R., G r a n t C.R., H o u g h t o n R.L. and T h o m p s o n H.P. // IEEE Trans. on Magn. 1989. V. 25. N° 1. P. 63–67.
- [6] Д р о б ы ш е в с к и й Э.М., Ж у к о в Б.Г., Н а з а р о в Е.В. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 4. С. 170–179.
- [7] Ю ф е р е в С.В., Ю ф е р е в В.С. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 11. С. 21–27.
- [8] Ш н е е р с о н Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 414 с.
- [9] Д р о б ы ш е в с к и й Э.М., Ж у к о в Б.Г., Н а з а р о в Е.В. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 8. С. 100–106.

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

Поступило в Редакцию
5 марта 1993 г.