

- дугой. — In: Proceedings of the 3rd Intern. Symposium on Switching Arc Phenomena. Poland, Lodz, 1977.
8. Mayr O. Beitrag zur Theorie des statischen und dynamischen Lichtbogens. — Archiv für Elektrotechnik, 1943, Bd 37, N 12.
9. Cassie A. M. A new theory of rupture and circuit severity. CiGRE, 1939, Rep. N 102.

УДК 538.54.001

О ТЕПЛОВОМ ОГРАНИЧЕНИИ СКОРОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ПРОВОДНИКОВ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ АКСИАЛЬНОМ УСКОРЕНИИ

А. М. Балтаханов, Е. Н. Иванов

(Истра)

В [1,2] экспериментально показана возможность получения на электромагнитных ускорителях скоростей 1—5 км/с. плоских кольцевых проводников. Одним из основных ограничений в достижении высоких скоростей при метании проводников в магнитном поле является нагрев проводника и переход его из твердого состояния в жидкое и газообразное. Вместе с тем при практическом использовании высокоскоростных ускорителей макрочастиц возникает задача определения физико-механических свойств и физического состояния метаемых ударников. Экспериментально решить указанную задачу чрезвычайно сложно из-за кратковременности процесса ускорения и высоких скоростей ударников. В [3] путем приближенного анализа получено соотношение, устанавливающее связь процесса нагрева и электромагнитного ускорения проводника, справедливая в диапазоне от температуры кипения азота до температуры плавления соответствующего металла, а в [4,5] получены выражения для предельной скорости плоских металлических макрочастиц в идеальном случае ускорения их в одномерном магнитном поле.

В данной работе рассмотрены процессы нагрева при ускорении плоского металлического кольца в двумерном импульсном магнитном поле одновиткового индуктора.

Принципиальная схема ускорения показана на фиг. 1. Система интегродифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические переходные процессы в рассматриваемом устройстве, имеет вид [6]

$$(1) \quad \tilde{\delta}(Q, t) + \frac{\mu_0 \gamma(Q, t)}{2\pi} \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^2 \int_{S_i} \tilde{\delta}(M, t) K(Q, M) ds_i =$$

$$= \begin{cases} \frac{\gamma(Q, t)}{2\pi \sqrt{r_Q}} \varphi[i_1(t)] & \text{для } i=1, \\ 0 & \text{для } i=2; \end{cases}$$

$$(2) \quad m \frac{dv}{dt} = \mu_0 \int_{S_2} \tilde{\delta}(Q, t) \sum_{i=1}^2 \int_{S_i} \tilde{\delta}(M, t) \frac{z_Q - z_M}{\sqrt{(z_Q - z_M)^2 + (r_Q + r_M)^2}} \frac{1}{\sqrt{r_M r_Q}} \times$$

$$\times \left[-K + \frac{(z_Q - z_M)^2 + r_Q^2 + r_M^2}{(r_Q - r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2} E \right] ds_i ds_j;$$

$$(3) \quad \frac{dz}{dt} = v,$$

где

$$\varphi[i_1(t)] = U_0 - R_0 i_1 - L_0 \frac{di_1}{dt} - \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt; \quad i_1 = \int_{S_1} \frac{\tilde{\delta}(M, t)}{\sqrt{r_M}} ds_1;$$

$\tilde{\delta}(Q, t) = \delta(Q, t) \sqrt{r_Q}$; S_i — меридианное сечение проводников индуктора ($i=1$) и ускоряемого кольца ($i=2$); v — скорость кольца; z — расстояние между индуктором и кольцом; L_0, R_0 — внутренние индуктивность и активное сопротивление емкостного накопителя энергии; Q, M — произвольные точки в меридианном сечении проводников s_i ; $K(Q, M) =$

$= (2/k - k)K(k) - (2/k)E(k); \quad k = 2\sqrt{r_M r_Q} / \sqrt{(r_Q + r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2}$ — модуль полных эллиптических интегралов первого $K(k)$ и второго $E(k)$ рода [7].

При учете изменения электропроводности проводника вследствие джоулева нагрева его током плотностью δ , следуя [4], пренебрежем вкладом теплопроводности в процессе изменения внутренней энергии проводника, эффектами, связанными со сжимаемостью материалов и фазовыми превращениями, и будем полагать, что тепловое уравнение имеет вид

$$(4) \quad \partial W(Q, t) / \partial t = (\delta^2(Q, t) / \gamma(Q, t_0)) [1 + \beta W(Q, t)],$$

где β — тепловой коэффициент; $W(Q, t)$ — прирост теплосодержания по отношению к состоянию при 0°C .

Решение системы уравнений (1)–(4) проводилось численным методом аналогично [6]. Сравнение расчетных значений конечной скорости кольца с экспериментальными данными (описание экспериментов приведено в [1, 2]) показало их хорошее согласие (расхождение не превышает погрешности экспериментального измерения скорости).

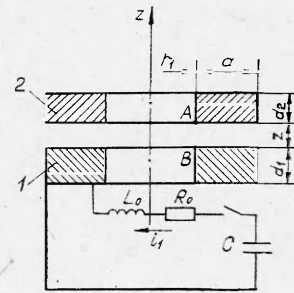
Математическая модель позволяет рассчитывать температуру и удельную электропроводность металла ускоряемого кольца и индуктора в любой момент времени. При определении относительной удельной электропроводности металла $\gamma^* = \gamma / \gamma_0$, соответствующей фазовому переходу (табл. 1), использовались значения интеграла тока, приведенные в [4], которые определены из экспериментов по взрыву проводников. На фиг. 2 представлены результаты расчета процесса нагрева при ускорении алюминиевого проводника в магнитном поле медного индуктора при разряде на него емкостного накопителя энергии ($C = 120$ мкФ, $L_0 = 90$ нГ, $U_0 = 40$ кВ, $R_0 = 3$ мОм, $d_1 = 1,4$ мм, $d_2 = 1$ мм, $r_1 = 13$ мм, $a_1 = a_2 = 6$ мм, $z_0 = 0,2$ мм, $a - b : t = 1,9; 3,8; 6,8$ мкс, $v = 1,37; 2,78; 3,2$ км/с, $z = 1,1; 5,3; 14,7$ мм соответственно).

На сечении проводников нанесены линии одинаковой удельной электропроводности в различные моменты времени, что позволяет проследить процесс нагрева проводников и движения границы жидкого металла. Ввиду неравномерности распределения токов по сечению кольца и индуктора плавление начинается в наиболее нагретых точках сечения (точки А и В, см. фиг. 1).

Расчетным путем определялась предельно достижимая скорость ускоряемого кольца $v_{пр}$, при которой наиболее нагретая область сечения кольца достигает точки плавления ($\gamma_{Al}^* = 0,154$, $\gamma_{Cu}^* = 0,121$), но материал проводника находится в твердом состоянии.

В качестве примера в табл. 2 представлены результаты расчета $v_{пр}$ при индукционном ускорении алюминиевых проводников различной толщины ($C = 120$ мкФ, $L_0 = 90$ нГ, $U_0 = 100$ кВ, $R_0 = 3$ мОм, $r_1 = 13$ мм, $a_1 = a_2 = 6$ мм, $d_1 = 1,4$ мм, $z_0 = 0,2$ мм).

Для наглядности и большей общности результатов в указанном при-



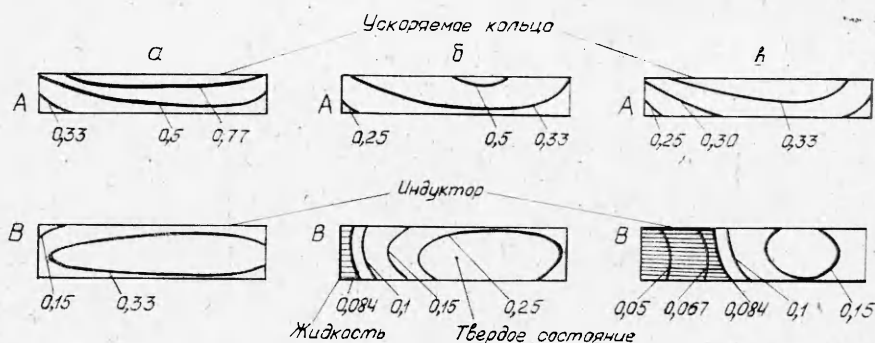
Ф и г. 1

Т а б л и ц а 1

Металл	Температура плавления		Температура кипения	
	твердое состояние	жидкость	жидкость	пар
	γ_{sm}^*	γ_{lm}^*	γ_{lb}^*	γ_{vb}^*
Al	0,154	0,096	0,032	0,0017
Cu	0,121	0,084	0,053	0,010

Т а б л и ц а 2

Толщина кольца d_2 , мм	Предельная скорость		
	$v_{пр}$, км/с	$v'_{пр}$, км/с [4]	$v''_{пр}$, км/с [3, 5]
1,0	5,15	7,42	13,1
0,8	3,98	5,94	10,5
0,6	3,60	4,46	7,8
0,4	2,27	2,97	5,2



Ф и г. 2

мере энергия накопителя выбрана больше той, которая необходима для достижения скорости $v_{пр}$, так что и после достижения $v_{пр}$ кольцо продолжает получать энергию, которая может привести к полному его расплавлению и даже испарению. Из табл. 2 видно, что $v_{пр}$ при ускорении кольцевых проводников оказывается ниже $v_{пр}$, рассчитанной по формулам для определения предельной скорости перемещения тонкого листа [4], и ниже $v_{пр}''$, рассчитанной по формулам [3, 5] при условии воздействия на ускоряемый проводник плоской электромагнитной волны. Таким образом, при определении $v_{пр}$ необходимо учитывать геометрию ускоряемого проводника и индуктора.

Поступила 12 V 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондалетов В. И., Иванов Е. И. Бесконтактное индукционное ускорение проводников до гиперзвуковых скоростей. — ПМТФ, 1975, № 5.
2. Бондалетов В. И., Иванов Е. И. Сверхвысокоскоростное аксиальное ускорение кольцевых проводников. — ЖТФ, 1977, т. 47, вып. 2.
3. Бондалетов В. И. Индукционное ускорение проводников. — ЖТФ, 1967, т. 37, вып. 2.
4. Кноцфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
5. Линхарт Дж. Ускорение макрочастиц до гиперскоростей. — В кн.: Физика высоких плотностей энергии / Под. ред. П. Кальдироды и Г. Кноцфеля. М.: Мир, 1974.
6. Балтаханов А. М., Бондалетов В. И. Ускорение проводников в магнитном поле. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, № 3.
7. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1964.

УДК 629.7.036.74

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО УСКОРИТЕЛЯ С АНОДНЫМ СЛОЕМ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

А. Ф. Коврижко, И. Н. Сафронов, А. В. Семенкин

(Калининград Моск. области)

Двухступенчатый ускоритель с анодным слоем (УАС), обладая высокой эффективностью ускорения, имеет достаточно сложную систему электропитания, состоящую из двух независимых источников питания [1—4]. Сложная система питания ограничивает область применения ускорителей. В данной статье приводятся результаты исследования работы двухступенчатого УАС с упрощенной схемой электропитания, содержащей один источник и RC -делитель. На фиг. 1 (1 — анод-парораспределитель, 2 — катоды первой ступени, 3 — катоды второй ступени — экраны полюсов магнитной системы, 4 — токоприемник) представлены схемы электропитания как с двумя (фиг. 1, а), так и с одним источником питания (фиг. 1, б).