

**ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
УСКОРЕНИЯ МАКРОТЕЛ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЯКОРЯ**

УДК 620.193.1; 629.036.72

А. В. Плеханов, А. Н. Терещенко, Д. В. Хандрыга

**Люберецкое научно-производственное объединение «Союз»,
140056 Дзержинский Московской области**

Разгон макротел в рельсовом электромагнитном ускорителе (РЭУ) с помощью металлического якоря предпочтителен по многим причинам, основными из которых, на наш взгляд, являются: 1) возможность эффективно разгонять тяжелые макротела (массой в сотни граммов и несколько килограммов), 2) малое падение напряжения на контакте рельс/якорь, 3) более высокий по сравнению с плазменным якорем ресурс ускорителя.

Однако в этом случае возникает и много явлений, физическая природа которых в настоящее время не до конца понятна. В частности, не известно, какое давление в скользящем контакте рельс/якорь достаточно для обеспечения надежного электрического контакта, как сказывается на процессе выстрела деформирование метаемого тела и др.

В [1] численно изучалось влияние материала якоря на динамику разгона в ускорителе с медными рельсами; рассматривались следующие материалы якоря: Al, Cu, W, Mo. Проведенные предварительные исследования показали, что на динамику разгона в большей степени оказывает влияние конструкция самого тела и в меньшей степени — свойства материала якоря.

В упрощенном виде влияние напряженно-деформированного состояния макротел на процесс ускорения в РЭУ рассмотрено в [2]. Получено аналитическое выражение для коэффициента, снижающего за счет деформации и соответствующего увеличения силы трения пондеромоторную силу.

В данной работе методом конечных элементов изучается один из факторов, оказывающих влияние на силу трения в условиях высокоскоростного скользящего контакта, — полная сила нормального давления, которая поджимает якорь к поверхности канала ствола ускорителя. Сила трения пропорциональна силе нормального давления. Снижая эту силу, можно уменьшить потери энергии на трение и, следовательно, увеличить эффективность электромагнитного метания. Основные численные результаты подтверждаются экспериментальными.

1. На примере цилиндрического якоря (рис. 1), перемещающегося по каналу круглого сечения, рассмотрим факторы, оказывающие влияние на уровень сил нормального давления. Заметим, что в этом случае контакт между якорем и каналом ствола осуществляется по некоторой цилиндрической поверхности радиуса r_0 и сила нормального давления

$$N = r_0 \int_0^{2\pi} \int_0^L p(\psi, z) d\psi dz, \quad (1.1)$$

где ψ, z — цилиндрические координаты; p — давление на поверхности контакта (контактное давление); L — длина образующей цилиндрической поверхности контакта.

Из соотношения (1.1) вытекает, что для уменьшения полной силы нормального давления, а следовательно, и потерь энергии на трение необходимо либо уменьшить значения L и p , либо стремиться к такому их соотношению, при котором полная сила нормального давления N будет минимальной.

Контактное давление на разных участках контактной поверхности имеет различную физическую природу. На участке электрического контакта якоря с рельсами контактное давление состоит из активного давления p_a , обусловленного действием электромагнитных сил, и пассивного давления p_n , обусловленного совместным поперечным деформированием якоря и канала ствола под действием сил инерции и натяга. Ясно, что активное давление необходимо для обеспечения надежного скользящего электрического контакта. Поэтому уменьшение длины данного участка (далее будем называть его активным участком) и контактного давления на нем может привести не к снижению потерь энергии, а наоборот, к их росту за счет увеличения электрического сопротивления в зонах плохого электрического контакта.

На остальной части контактной поверхности (далее будем называть ее пассивным участком) действует в основном пассивное давление p_n . Пассивное давление и длина пассивного участка контактной поверхности L_n (рис. 1), на котором действует давление, зависят от условий совместного деформирования якоря и канала ствола под влиянием рабочих нагрузок и в каждом конкретном случае могут быть определены из решения контактной задачи механики деформируемого твердого тела.

Учитывая сказанное выше, соотношение (1.1) можно переписать в виде

$$N = N_a + N_n. \quad (1.2)$$

Здесь

$$N_a = r_0 \int_0^{2\pi} \int_0^L (p_a(\psi, z) + p_n(\psi, z)) d\psi dz. \quad (1.3)$$

$$N_n = r_0 \int_0^{2\pi} \int_0^L p_n(\psi, z) d\psi dz. \quad (1.4)$$

В данной работе не рассматриваются силы давления в зоне электрического контакта (N_a), так как их определение требует корректного расчета трехмерных электромагнитных полей, что представляет собой самостоятельную достаточно сложную задачу. В дальнейшем исследуется сила N_n , непосредственно влияющая на потерю энергии за счет силы трения.

Для цилиндрического якоря контактное давление p_n является осесимметричным и соотношение (1.4) принимает вид

$$N_n = 2\pi r_0 \int_0^L p_n(z) dz.$$

Длина пассивного участка L_n может быть определена из геометрии

$$L_n = L - L_a.$$

В простейшем случае длина активного участка $L_a \approx L_k + \delta$, где L_k — глубина проточки в якоре; δ — средняя толщина скин-слоя за время ускорения. Учитывая, что в большинстве практически важных случаев $L_k \gg \delta$, при оценке силы нормального давления N_n

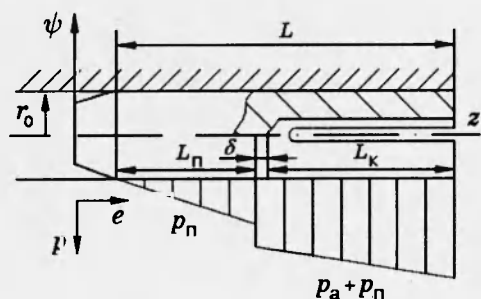


Рис. 1

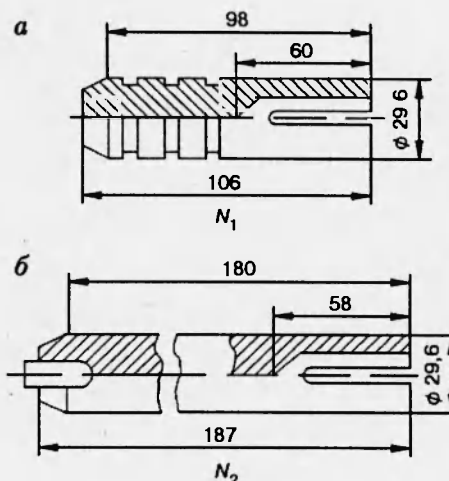


Рис. 2

Таблица 1

Тип макротела	Масса, г	L_k , мм	Диаметр, мм	L_a , мм	L_n , мм
N_1	150	98	29,5	60	40*
N_2 (с нагрузкой)	320	180	29,6	58	122

Примечание. * — без учета концевых выточек.

можно полагать $L_a \approx L_k$.

Полученные соотношения позволяют проводить сравнительный анализ возможных потерь энергии на силу трения при электромагнитном ускорении токопроводящих якорей различных конструкций и сформулировать рекомендации по совершенствованию этих конструкций с целью снижения потерь.

Проведем сравнительный анализ двух цилиндрических якорей, конструкции которых показаны на рис. 2 (размеры в миллиметрах), а основные массогабаритные характеристики приведены в табл. 1. Якори изготовлены из алюминиевого сплава, в головной части якоря N_2 размещена полезная нагрузка массой 87 г.

Расчет контактного давления был проведен с помощью конечно-элементной вычислительной программы, базирующейся на решении статической осесимметричной контактной задачи упругости методом конечных элементов и позволяющей учитывать геометрическую форму и особенности конструкции якоря, а также контактное взаимодействие якоря с поверхностью канала ускорителя.

При проведении расчетов действие на подвижный якорь электромагнитных сил моделировалось действием массовых сил, приложенных к якорю, который опирается торцевой поверхностью на абсолютно жесткую стенку. Основные исходные данные, используемые при расчете контактного давления, приведены в табл. 2.

Результаты расчетов в виде кривых распределения контактного давления по длине пассивных участков контакта двух типов якорей (кривые 1 и 2 соответственно для якорей N_1 и N_2) представлены на рис. 3. Здесь по оси абсцисс откладывается текущая длина образующей контактной поверхности; причем начало оси совмещено с точкой начала контакта со стороны головной части якоря. В такой системе координат интеграл (1.4) численно ра-

Таблица 2

Тип макротела	Максимальное ускорение, м/с ²	Характеристики материала якоря		
		Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, г/см ³
N_1	1400000	75,3	0,31	2,79
N_2	500000	75,3	0,31	2,79

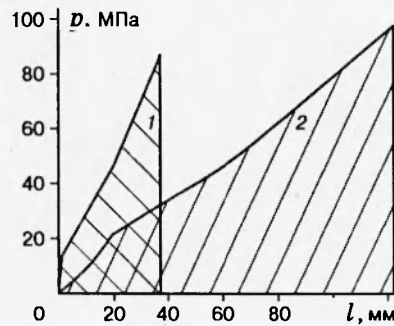


Рис. 3

вен площади плоской фигуры, образованной кривой контактного давления, осью абсцисс и перпендикуляром, опущенным из конца кривой давления на ось абсцисс. Чем больше площадь фигуры, тем больше сила нормального давления и, следовательно, больше потери энергии на трение. Сравнение площадей фигур, образованных кривыми 1 и 2, показывает, что при максимальном ускорении якоря типа N_1 потери энергии на трение в 12,5 раза меньше, чем при максимальном ускорении якоря типа N_2 .

Длина пассивного участка контакта якорей типа N_2 , а следовательно, и потери энергии на трение может быть уменьшена конструктивно за счет введения на этом участке широкой кольцевой проточки. Ее размеры существенно зависят от длины и массы якоря, уровня нагрузок, действующих на якорь в процессе разгона, разности диаметров якоря и канала ствола ускорителя, механических свойств материала, из которого изготовлен якорь, и должны выбираться исходя из следующих основных требований к проточке: она не должна нарушать устойчивость перемещения якоря по каналу ствола ускорителя; должна обеспечить гарантированный зазор между якорем и каналом ствола на всем участке ускорения; форма проточки должна исключить возможность появления концентраторов напряжения, которые бы существенно повлияли на прочность якоря.

Всем перечисленным выше требованиям удовлетворяет проточка, выполненная на якоре типа N_2 (рис. 4, размеры в миллиметрах). Пассивный участок контакта разделен на две части: головную, которая обеспечивает устойчивость перемещения якоря по стволу, и хвостовую, которая обеспечивает плавный переход к активному участку контакта.

На рис. 5 (кривая 1) представлено распределение контактного давления на пассивном участке контактной поверхности для якоря типа N_2 с проточкой. Оценка силы давления в этом случае показывает, что оно примерно в 2 раза больше силы нормального давления в якоре типа N_1 (см. рис. 2). Таким образом, можно ожидать, что для якоря типа N_2 с проточкой потери энергии за счет трения на пассивном участке контакта существенно сократятся.

На рис. 6 показано распределение радиальных перемещений по длине проточки в яко-

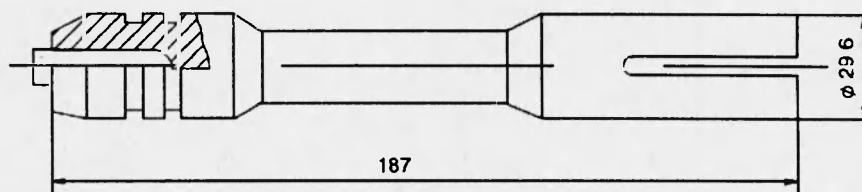


Рис. 4

Таблица 3

Номер опыта	Параметры метаемого тела				V_0	Дуль-ная скорость	Энерго-запас батареи, МДж	Θ^1	$\eta_{РЭУ}^3$	$\eta_{БК}^4$
	Сум-марная масса	Масса-нагруз-ки	L	L_k						
	г		мм							
1	150,0	—	106	54	1,45	2,7	5,08	0,16	18,8	7,7
2	140,3	—	104	50	1,60	2,3	3,70	0,17	15,0	5,2
3	150,0	—	106	54	2,00	2,0	5,08	0,82	—	—
4 ²	320,0	87,0	167	51	1,05	1,6	5,08	0,50	—	3,6
5	327,0	107,0	190	37	1,05	1,5	5,08	0,50	10,0	3,7
6	305,4	84,2	159	43	1,10	1,6	5,08	0,43	11,2	5,6

Примечания:

- 1) фрикционный коэффициент (суммарное снижение пондеромоторной силы за счет трения);
- 2) отсутствует достоверная запись входного напряжения;
- 3) отношение прироста кинетической энергии метаемого тела к энергии, подведенной к ускорителю;
- 4) отношение прироста кинетической энергии метаемого тела к энергии, запасенной в батарее конденсаторов (БК).

ре. Видно, что максимальное перемещение вершины проточки составляет 8 мкм. Следовательно, при ускорении якоря зазор между ним и каналом ствола ускорителя в зоне проточки обеспечивается.

На рис. 5 (кривая 2) представлено распределение контактного давления для якоря с проточкой, у которого масса полезной нагрузки увеличена до 267 г. Максимальное ускорение якоря составило 440000 м/с^2 . Оценка силы нормального давления для этого случая показывает, что она возросла примерно в 2 раза по сравнению с исходным вариантом якоря. Максимальное перемещение в вершине проточки увеличилось до 17 мкм. Однако и в этом случае сила нормального давления оказывается примерно в 3, 4 раза меньше, чем сила нормального давления в якоре без кольцевой проточки. Это дает основание ожидать сокращения потерь энергии на преодоление трения при ускорении якоря типа N_2 с проточкой.

2. Основные параметры проведенных экспериментов приведены в табл. 3. В качестве источника электропитания использовалась батарея конденсаторов общей энергоемкостью около 5 МДж при напряжении заряда 4,3 кВ. Система управления энергоисточником позволяет формировать импульс тока в цепи ускорителя путем последовательного подключения модулей батареи через заданные времена, определяемые расчетным путем перед каждым экспериментом исходя из условий его проведения.

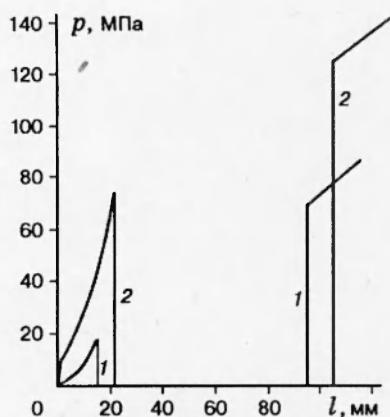


Рис. 5

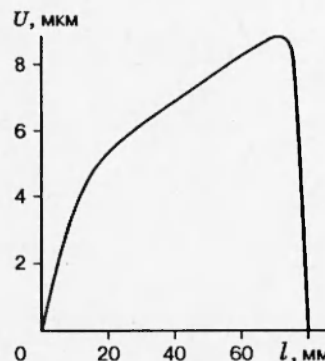


Рис. 6

Все эксперименты проведены на ускорителе МК, имеющем следующие параметры: калибр канала 30 мм, длина ствола 4,2 м, материал рельсов — бронза, материал изоляторов — стеклотекстолит. В качестве предускорителя использовалась пороховая пушка. В процессе экспериментов измерялись следующие параметры: ток в цепи ускорителя и отдельных цепях модулей батарей, падение напряжения на входе и выходе ускорителя, моменты времени прохождения токовым слоем индуктивных датчиков, расположенных по длине ускорителя, моменты пролета макротелом контактных датчиков на внешней трассе. Также проводилась киносъемка макротел в свободном полете. Более подробно описание установки приведено в [3].

Опыты условно можно разбить на 2 группы: 1) без нагрузки (№ 1–3), 2) с полезной нагрузкой (№ 4–6). Опыты без нагрузки позволили выбрать конструкцию токопроводящего элемента макротела (якоря), обеспечивающего последовательно металлический, квазиметаллический (микродуговой) и дуговой режимы протекания тока в скользящем контакте. Улучшение контакта происходило за счет организации принудительного поджима задней части якоря, в которой выполнен ослабляющий продольный разрез.

В опытах № 1, 2 получены скорости 2,1 ... 2,7 км/с; конструкция якоря была отработана при токах до 1240 кА, что позволило перейти к опытам с полезной нагрузкой и суммарной массой макротела более 300 г. В опытах № 4, 5 использовались макротела, конструкция которых показана на рис. 2, б.

Анализ экспериментов показал, что за счет повышения контактного давления резко увеличивается сила трения, а ускорения за счет пондеромоторной силы не происходит. Уменьшение пондеромоторной силы за счет силы трения превышает 50 %.

Конструкция макротела была доработана в соответствии с изложенными выше соображениями. Снижение длины скользящей поверхности за счет выточки позволило уменьшить силу трения (фрикционный коэффициент снизился до 0,43) и повысить дульную скорость. Это указывает на правильность понимания основных процессов, протекающих в метаэтом теле при разгоне в РЭУ.

Сравнение зависимостей скорости от времени $V(t)$ в случае использования тела без проточки и с проточкой (кривые 1 и 2) показано на рис. 7. Там же приведены результаты расчетов для идеального случая (кривая 3), когда трение отсутствует.

Таким образом, разработана численная модель, позволяющая рассчитывать контактное давление. Проведен сравнительный анализ двух цилиндрических U-образных якорей

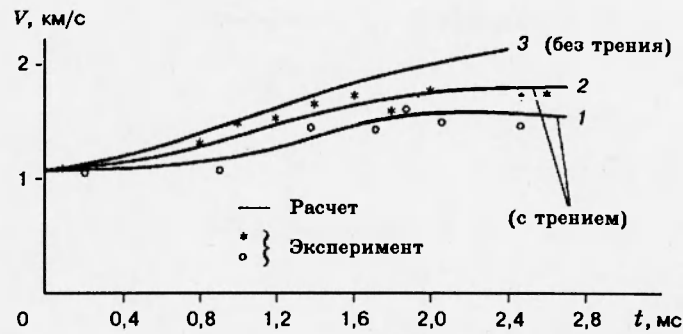


Рис. 7

(N_1 — без нагрузки, N_2 — с полезной нагрузкой в носовой части якоря). Показано, что потери энергии на трение якоря N_2 могут быть существенно уменьшены конструктивно за счет введения на пассивном участке якоря широкой кольцевой проточки.

Дальнейший прогресс в результатах связан с более корректным учетом баланса между силами, обеспечивающими необходимый для бездугового протекания тока в контакте поджим консольной части якоря, и силами нормального давления, ответственными за трение. Для этого необходимо решить задачу трехмерного распределения нестационарных электромагнитных, тепловых и силовых полей в зоне контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Urykov B. A., Lebedev A. D., Milyaev C. C. Influence of materials' properties on the dynamics of metal armature acceleration in a railgun // Proc. 4th Eur. Symp. on Electromagnetic Launch Technology, May 2-6, 1993. Celle, Germany. P. 1022.
2. Czu Hsiung Chu. A simple theoretical model for projectile in bore motion of electromagnetic railguns // Proc. 5th U. S. Army Symp. on Gun-dynamics. Sept. 23-25, 1987. P. 204-232.
3. Babakov Yu. P., Plekhanov A. V., Zheleznyi V. B. Range and railgun results at LS and PA «Soyuz» // IEEE Trans. Magn. 1995. V. 31, N 1. P. 259-262.

Поступила в редакцию 30/XII 1994 г.