

УДК 583.4+533.95

К АНАЛИЗУ ПРЕДЕЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬСОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

С. В. Станкевич, Г. А. Швецов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

На основе численного решения двумерных нестационарных уравнений диффузии магнитного поля и теплопередачи проведен сравнительный анализ зависимостей предельной по условиям нагрева скорости от размеров и теплофизических свойств тела и длины рельсового ускорителя. Рассматриваются однородные и многослойные тела, однородные рельсы и рельсы с резистивным покрытием. Показано, что, изменения структуру и теплофизические свойства материалов ускоряемого тела и электродов, можно существенно увеличить предельные кинематические характеристики рельсовых ускорителей твердых тел.

Введение. Одной из причин, ограничивающих достижение высоких скоростей при ускорении в рельсовых ускорителях твердых проводящих тел, являются потеря металлического контакта между телом (якорем) и рельсами (электродами) и переход к электродуговому режиму замыкания тока. Результаты численного моделирования электротермического состояния якоря показывают, что температура якоря неоднородна по его сечению, при этом температура максимальна в областях примыкания тыльной стороны якоря к поверхности рельсов, где происходит концентрация тока за счет скоростного скин-эффекта (ССЭ) [1–4]. Скорость тела, при которой начинается его плавление вблизи контактной границы рельсы — якорь, принято называть критической или предельной, при которой еще сохраняется металлический контакт. Для традиционных материалов значение критической скорости обычно порядка 1 км/с, что ограничивает в настоящее время использование твердых проводящих тел в рельсовых ускорителях. Поиску путей увеличения критической (предельной) скорости, или, другими словами, возможностей уменьшения концентрации тока, обусловленной ССЭ, посвящено значительное число работ, опубликованных в последнее время. Рассматривались многослойные тела с ортотропной электропроводностью, биметаллические рельсы с покрытием контактной стороны слоем материала с высоким электрическим сопротивлением и другие подходы (см., например, [1, 3–7]). Необходимо отметить, что полной ясности в потенциальной возможности композитных материалов для увеличения критической скорости нет. Иногда авторами делаются прямо противоположные выводы. В частности, утверждение автора работы [5] об эффективности применения высокоомного покрытия для повышения критической скорости находится в противоречии с заключением авторов работы [3], в которой такое покрытие не рекомендуется для использования в рельсовых ускорителях твердых тел. Причинами этих противоположных выводов могут быть как различные физические явления, принятые авторами при анализе скорости нагрева якоря, так и различные электротермические свойства исследовавшихся материалов покрытий (Мо и С).

В данной работе проведен сравнительный анализ влияния различных по электротермическим свойствам резистивных покрытий на предельные кинематические характеристики однородных и многослойных якорей в бездуговом режиме ускорения. Бездуговой режим определяется условием отсутствия плавления якоря в процессе ускорения. Учиты-

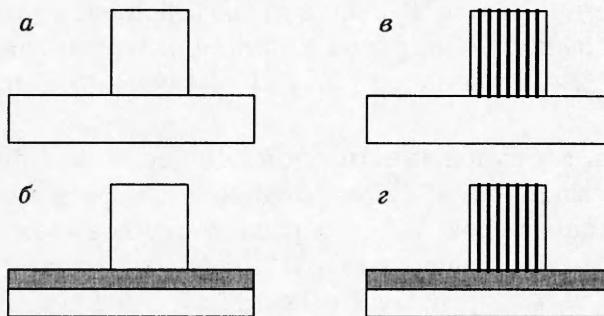


Рис. 1

ваются два физических процесса, оказывающих влияние на изменение температуры якоря: джоулев нагрев и теплопередача. Пренебрегая другими явлениями, ведущими к нагреву якоря и снижающими эффективность ускорения, в частности трением, получаем оценку сверху для предельных значений скорости при бездуговом режиме ускорения. Отличие полученных результатов от опубликованных в [3, 5] состоит в том, что предельная скорость вычисляется при двух условиях: отсутствии плавления якоря и заданной длине ускорителя.

Постановка задачи. Рассматривается ускорение однородных и многослойных твердых проводящих тел прямоугольного поперечного сечения с размерами $h \times l$ (h — расстояние между рельсами, l — длина якоря) в электромагнитных ускорителях с однородными рельсами и рельсами, имеющими на контактной стороне покрытие из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением. Конфигурация расчетных областей, представляющих одну половину продольных сечений рельсовых ускорителей, показана на рис. 1: *a* — однородные якорь и рельсы; *b* — однородный якорь и рельсы с резистивным слоем; *c* — многослойный якорь и однородные рельсы; *d* — многослойный якорь и рельсы с резистивным покрытием.

Зависящие от времени распределения магнитного поля и температуры в якоре и рельсах определялись на основе численного решения системы нестационарных уравнений диффузии магнитного поля и теплопередачи в двумерной постановке [6]. Предполагалось, что электротермические свойства материалов не зависят от температуры и на границах якорь — рельс и резистивный слой — подложка осуществляется идеальный электрический и тепловой контакт, т. е. при переходе через границу выполняются условия непрерывности магнитного поля, температуры, тангенциальной компоненты электрического поля, а также нормальных компонент плотности тока и теплового потока. Магнитное поле в канале рельсового ускорителя $H_0(t)$ в двумерной постановке полагалось известным и равным линейной плотности тока через якорь.

Исследования предельных кинематических характеристик металлического якоря показали, что предельная скорость слабо зависит от формы изменения во времени ускоряющего магнитного поля [4, 6], поэтому в данной работе использовался частный вид функциональной зависимости ускоряющего магнитного поля от времени $H_0(t) = H_n t^{n/2}$ (n — положительное целое число). Это значительно упрощает вычисления, так как позволяет путем подбора только одного параметра H_n обеспечить выполнение следующего условия: начало плавления должно соответствовать прохождению якорем заданной дистанции L . Расчеты проводились при $n = 1 \div 5$, однако установлено, что в рассматриваемых случаях зависимость предельной скорости от n слабая. Максимальное относительное изменение предельной скорости для указанного диапазона изменения n не превышает 5 %. Далее приводятся

результаты, полученные при $n = 1$. В качестве коэффициента пропорциональности между силой магнитного давления и квадратом амплитуды магнитного поля в канале вместо магнитной проницаемости вакуума $\mu_0 = 1,26 \text{ мкГн/м}$ использовалась погонная индуктивность $\lambda = 0,45 \text{ мкГн/м}$.

Однородный якорь и резистивный слой. Для исследования влияния резистивного слоя на предельные кинематические характеристики однородного якоря проведена серия расчетов для трех материалов слоя, электропроводности которых значительно отличаются: титана ($\sigma = 1,8 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), копели ($\sigma = 0,21 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и графита ($\sigma = 0,04 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Толщина слоя варьировалась в пределах от $0 \div 1,2 \text{ мм}$. Рассматривались якоря из алюминия, меди и вольфрама.

Применение резистивного слоя по-разному влияет на скорость изменения максимальной температуры якоря, а следовательно, и на предельную скорость V . В зависимости от толщины d и электропроводности слоя, электротермических свойств и размеров якоря, а также заданной дистанции ускорения может происходить как увеличение, так и уменьшение предельной скорости. При этом возможны два режима нагрева якоря: когда изменение температуры якоря определяется в основном протекающим по нему током и когда нагрев якоря происходит в основном в результате роста температуры контактных границ, обусловленного джоулевым нагревом резистивного слоя. Увеличение толщины резистивного слоя или его удельного сопротивления ведет к снижению концентрации тока на тыльных частях контактных границ якоря — рельсы, в результате чего уменьшается интенсивность джоулева нагрева якоря. Однако при этом увеличивается температура резистивного слоя на контактной поверхности как в результате роста в нем омических потерь, так и за счет уменьшения оттока тепла от контактной границы в глубь рельсов.

Увеличение температуры якоря, обусловленное джоулевым нагревом резистивного слоя, максимально на начальном этапе ускорения. По мере разгона якоря нагрев и температура резистивного слоя уменьшаются, при этом уменьшается и максимальная температура якоря. При дальнейшем увеличении скорости тела джоулев нагрев якоря, обусловленный концентрацией тока вследствие ССЭ, интенсифицируется, и температура якоря вновь начинает расти.

На рис. 2 представлены зависимости предельной скорости от толщины резистивного слоя для якорей из алюминия (а), меди (б) и вольфрама (в) различной длины (указана цифрами на кривых в миллиметрах) и различных материалов покрытий на медной подложке. Все зависимости получены для дистанции ускорения 1 м. Штриховыми линиями представлены зависимости, полученные для резистивного покрытия из графита, пунктирными — из титана и сплошными — из копели.

Для всех исследованных материалов тел применение резистивных покрытий из титана и копели приводит к увеличению предельной скорости по сравнению со случаем использования рельсов без покрытия ($d = 0$). Титановый слой обеспечивает небольшое увеличение предельной скорости ($15 \div 20\%$) при разгоне якоря из Al (рис. 2, а). Зависимости, полученные для якорей из W и Cu на рельсах с титановым покрытием, дали такое же относительное увеличение предельной скорости. Слой из копели позволяет увеличить предельную скорость в 2–3 раза.

Как показано на рис. 2, величина предельной скорости уменьшается при увеличении длины якоря. Такая зависимость характерна для случаев, когда преобладает джоулев нагрев якоря, интенсивность которого определяется концентрацией тока, происходящей вследствие ССЭ. Графитовое покрытие увеличивает предельную скорость для якорей из W и Al при $l > 2 \text{ мм}$, для медного якоря при $l > 5 \text{ мм}$. Максимум предельной скорости для графитового покрытия достигается при переходе от режима нагрева якоря, определяемого нагревом резистивного слоя (малые l), к режиму нагрева, определяемому ССЭ.

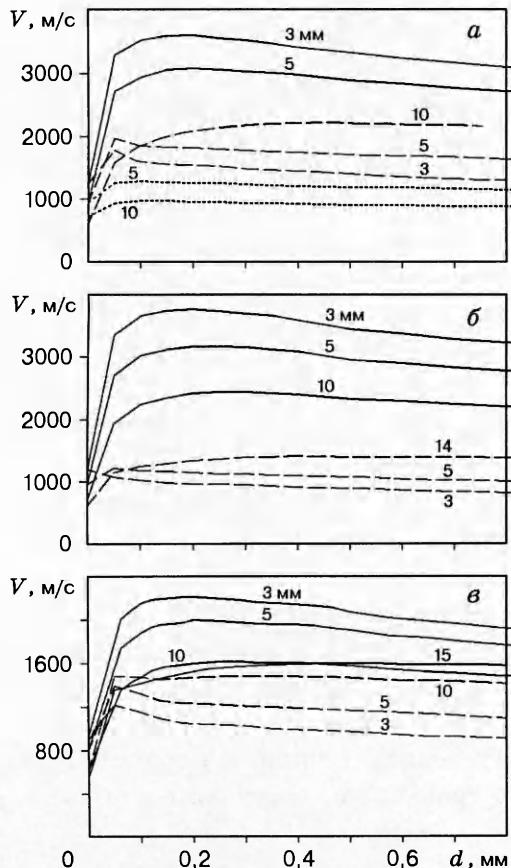


Рис. 2

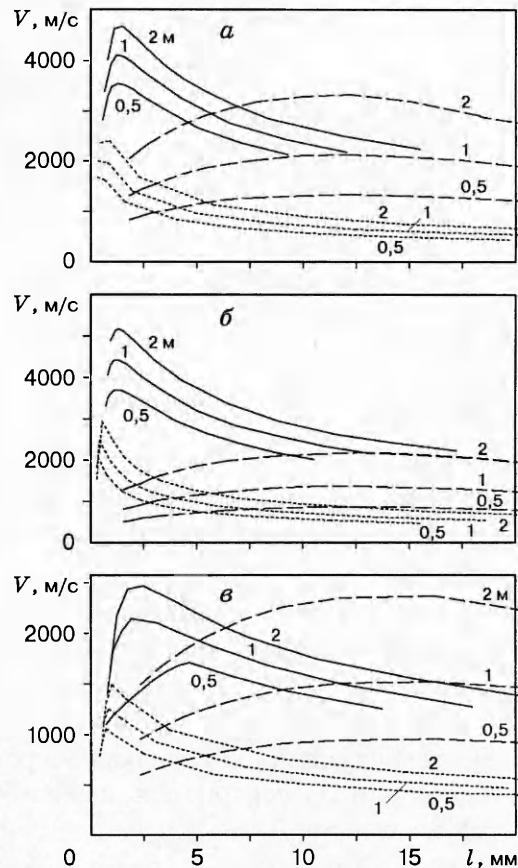


Рис. 3

Для всех случаев, представленных на рис. 2, характерен быстрый рост предельной скорости якоря при увеличении толщины резистивного слоя d от нуля до некоторого значения $d_{\text{опт}}$ и медленное уменьшение при дальнейшем увеличении d . Оптимальная толщина резистивного слоя различна для всех исследованных материалов покрытия: минимальна для покрытия из Ti (порядка 50 мкм) и максимальна для графита (порядка 400 мкм). Расчеты показывают, что $d_{\text{опт}}$ слабо зависит от длины якоря и дистанции ускорения. Уменьшение $d_{\text{опт}}$ наблюдается при увеличении длины якоря, и, напротив, рост $d_{\text{опт}}$ происходит при увеличении дистанции ускорения. Отметим, что относительные изменения скорости при изменении толщины слоя в пределах от $0,5d_{\text{опт}}$ до $2d_{\text{опт}}$ во всех случаях не превышают 5 %. Максимальное увеличение предельной скорости получено для резистивного покрытия из графита. Далее приводятся результаты, полученные для резистивных покрытий толщиной 250 мкм; этот размер, как показано на рис. 2, обеспечивает почти максимальное увеличение предельной скорости.

На рис. 3 представлены зависимости предельной скорости от длины якоря, рассчитанные при дистанциях ускорения $L = 0,5; 1; 2$ м для однородных якорей из алюминия (а), меди (б) и вольфрама (в). Сплошными линиями обозначены зависимости, полученные для резистивного слоя из копели, штриховыми — из графита. Пунктирными кривыми показаны зависимости, полученные для медных рельсов без резистивного слоя. Цифрами на кривых указаны дистанции ускорения в метрах. Для всех зависимостей характерно возрастание предельной скорости при увеличении дистанции ускорения, при этом максимум предельной скорости сдвигается в область меньших длин якоря. Отмечено, что для

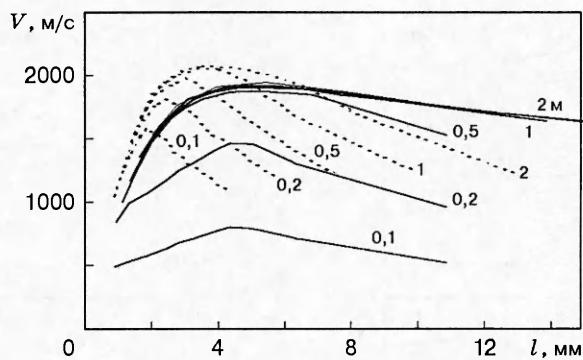


Рис. 4

зависимостей, отвечающих покрытию из графита, с ростом L происходит более быстрое относительное увеличение предельной скорости, чем для покрытия из копели и рельсов без покрытия.

Из рассмотренных материалов максимальная предельная скорость достигается при использовании покрытия из копели, при этом линейные размеры якоря невелики (около $2 \div 4$ мм для $L = 1 \div 2$ м). Для графитового покрытия максимальная предельная скорость меньше, чем для покрытия из копели, но ее максимум достигается при больших длинах якоря. В этом случае кинетическая энергия тела, отнесенная к единице площади поперечного сечения канала ускорителя, намного больше по сравнению со случаем использования покрытия из копели.

Многослойный якорь и резистивный слой. В рельсовых ускорителях с однородными рельсами предельные скорости тел, состоящих из чередующихся проводящих и непроводящих слоев (см. рис. 1, б), значительно превосходят предельные скорости однородных якорей (см. рис. 1, а) [7], причем для якоря с ортотропной проводимостью максимальная предельная скорость достигается при больших его длинах по сравнению с якорем из однородных материалов.

Представляло интерес проверить возможность дальнейшего сдвига максимума предельной скорости ортотропного якоря в область больших значений l при использовании рельсов с резистивным покрытием (см. рис. 1, г). Рассчитанные для этого случая предельные скорости вольфрамового якоря в зависимости от его длины для дистанций ускорения $0,1; 0,2; 0,5; 1; 2$ м представлены на рис. 4. Пунктирными кривыми показаны результаты расчетов, проведенных для многослойного якоря и рельсов без покрытия (см. рис. 1, б), сплошными — для якоря этого же типа и рельсов с резистивным покрытием из копели (см. рис. 1, г). Цифрами на кривых указаны дистанции ускорения в метрах. Видно, что действительно происходит сдвиг максимума предельной скорости в область больших величин l , причем этот максимум довольно пологий.

Несмотря на то что максимальная предельная скорость многослойного якоря меньше максимальной предельной скорости однородного якоря на рельсах с резистивным покрытием, с увеличением значений l соотношение скоростей меняется. Существенно, что в этом случае при $L > 0,5$ м отсутствует зависимость предельной скорости от дистанции ускорения. Аналогичная зависимость имеет место и для якорей с ортотропной проводимостью из Al и Cu, причем предельная скорость для этих якорей при $L \geq 0,5$ м не зависит от дистанции ускорения. Это свидетельствует о том, что размеры области протекания тока через контактную границу определяются в основном свойствами и размерами резистивного покрытия (в данном случае копели).

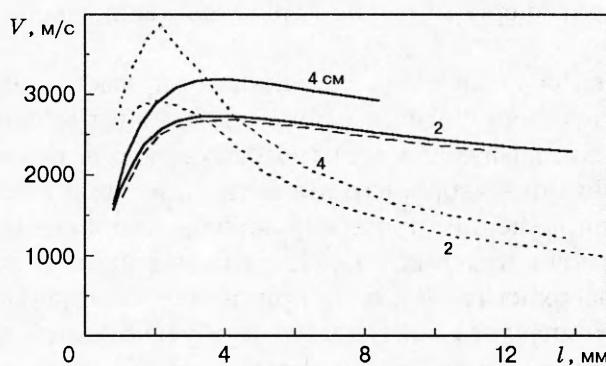


Рис. 5

При $l > 5 \div 7$ см на рельсах с покрытием из копели многослойный якорь на дистанциях ускорения меньше 1 м обеспечивает большее увеличение предельной скорости по сравнению с однородными рельсами. В этом случае происходит некоторое увеличение характерного размера области протекания тока через контактную границу в результате диффузии поля вдоль изолирующих слоев.

В результате расчетов не выявлено существенного отличия предельной скорости многослойного якоря в сочетании с графитовым покрытием на рельсах от предельной скорости однородного якоря на этих же рельсах (см. рис. 3, б; штриховые кривые).

Как показывает анализ, степень концентрации тока в многослойном якоре с ортотропной электрической проводимостью обратно пропорциональна высоте канала рельсового ускорителя. На рис. 5 представлены зависимости предельной скорости от длины якоря, рассчитанные для многослойного якоря при использовании рельсов без покрытия (пунктирные линии) и с резистивным слоем из копели (сплошные линии), полученные при значениях $L = 1$ м и $h = 2$; 4 см. Цифрами на кривых указана величина h (в сантиметрах).

Можно отметить увеличение предельной скорости с ростом h , хотя оно меньше, чем в случае использования рельсов без резистивного слоя. Это является результатом того, что область концентрации тока на контактной границе в значительной мере определяется размерами и электропроводностью резистивного покрытия.

На рельсах с покрытием из копели зависимости предельной скорости от размеров якоря при заданной длине ускорения для многослойных якорей из меди и алюминия практически совпадают с зависимостями, полученными для многослойного якоря из вольфрама. На рис. 5 для примера приведена соответствующая зависимость для медного многослойного якоря (штриховая кривая).

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения резистивного покрытия для уменьшения концентрации тока в якоре, обусловленной скоростным скин-эффектом. Это позволяет значительно снизить скорость нагрева якоря вблизи контактных границ, в результате чего максимальная скорость, до которой может быть ускорен якорь в стволе заданной длины при сохранении твердого металлического контакта якоря с рельсами, может быть увеличена в $2 \div 4$ раза, а кинетическая энергия тела — в $4 \div 16$ раз по сравнению со случаем использования рельсов без покрытия. При дальнейшем уменьшении электропроводности резистивного слоя концентрация тока в якоре будет уменьшаться, однако в этом случае может происходить перегрев и разрушение резистивного слоя.

Использование многослойного якоря с ортотропной электрической проводимостью в комбинации с резистивным покрытием на контактной стороне рельсов позволяет полу-

чить высокие скоростные и энергетические характеристики якоря на малых дистанциях ускорения.

Следует отметить ряд особенностей, связанных с применением резистивного покрытия, которые могут значительно снизить реально достижимые скорости. Первая связана с более высокой скоростью диффузии магнитного поля вдоль резистивного слоя по сравнению со скоростью диффузии в якоре, что приводит к возникновению тока в якоре вдоль контактной границы в направлении, противоположном направлению тока в рельсе. В результате взаимодействия этих токов возникает сила магнитного давления, расталкивающая контактирующие поверхности. Если не принимать специальных мер, то это может привести к потере металлического контакта между ускоряемым телом и рельсами. Так как по мере проникновения магнитного поля в якорь и увеличения его скорости расталкивающая сила уменьшается, то одним из способов преодоления этого явления может быть применение резистивного слоя с проводимостью, уменьшающейся по определенному закону в направлении движения. Другая особенность связана с разрушением резистивного слоя в результате возникновения в нем значительных термических напряжений, обусловленных резкими изменениями температуры на границах резистивного слоя. Для уменьшения таких напряжений необходим резистивный материал с высокими теплопроводностью, температурой плавления и механической прочностью. В связи с этим представляется перспективным применение резистивных покрытий из композитных материалов (в частности, полученных методом взрывного компактирования порошков).

ЛИТЕРАТУРА

1. Young F. J., Hughes W. F. Rail and armature current distribution in electromagnetic launchers // IEEE Trans. Magn. 1982. V. 18, N 1. P. 33–41.
2. Thornhill L. D., Batteh J. D., Brown J. L. Armature options for hypervelocity railguns // IEEE Trans. Magn. 1989. V. 25, N 1. P. 552–557.
3. Long G. C., Weldon W. F. Limits to the velocity of solid armature in railgun // Ibid. P. 347–352.
4. Shvetsov G. A., Stankevich S. V. Ultimate velocities of plates accelerated by magnetic field // Proc. 6th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Albuquerque, USA, Nov. 8–11, 1992. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1994. P. 385–397.
5. Dreizin Yu. A. Solid armature performance with resistive rails // IEEE Trans. Magn. 1993. V. 29, N 1. P. 798–803.
6. Shvetsov G. A., Stankevich S. V. Ultimate velocities of multilayer projectiles in the induction and railgun accelerators // Proc. 5th Europ. Symp. on EML Technology. Toulouse, France, Apr. 10–13, 1995. P. 53.
7. Shvetsov G. A., Stankevich S. V. Ultimate kinematic characteristics of armatures with orthotropic and anisotropic electroconductivity // IEEE Trans. Magn. 1977. V. 33, N 1. P. 266–271.

Поступила в редакцию 29/VI 1998 г.