

Пункт ГОСТ 1643–81 «2.3.3. Допускается оценивать точность зубчатого колеса по суммарному или мгновенному пятну контакта его зубьев с зубьями измерительного колеса» не должен использоваться применительно к зубчатым колесам планетарных передач, имеющих подвижные рабочие оси.

Целесообразно применительно к зубчатым колесам планетарных передач использовать положения немецких стандартов DIN 3962 по разделению общей погрешности профиля (F_f – Profil-Gesamtabweichung) и общей погрешности контактной линии (F_β – Flankenlinien-Gesamtabweichung) на погрешности угла и погрешности формы. Отметим, что в стандартах DIN 3962 пятно контакта оценивается в собранной передаче под нагрузкой (TRA – Tragbild).

Следует заметить, что большинство предприятий, занимающихся изготовлением планетарных зубчатых передач, оснащено зарубежными координатно-измерительными центрами, которые обеспечивают измерение зубчатых колес в системе стандартов DIN, однако из результатов этих измерений используются только суммарные погрешности направления и профиля зуба по ГОСТ 1643–81.

Заключение

1. Использование положений ГОСТ 1643–81 к формулировкам норм пятна контакта следует проводить с учетом особенностей конструкции планетарных передач.

2. Наиболее целесообразным для достижения расчетного ресурса является требование обеспечения суммарного пятна контакта как части активной боковой поверхности зуба зубчатого колеса, на которой располагаются следы прилегания зубьев парного зубчатого колеса в собранной передаче после вращения под нагрузкой, устанавливаемой конструктором.

3. Для отработки суммарного пятна контакта в собранной передаче требуется проведение комплекса исследований по разработке модификаций

зубьев и технологического обеспечения их изготовления и контроля.

4. При отработке суммарного пятна контакта целесообразно использование параметров погрешности направления и погрешности профиля зуба из стандартов DIN 3962.

5. Обеспечение суммарного пятна контакта в собранной планетарной передаче может осуществляться контролем параметров модификации и специальных пятен контакта при контроле отдельных пар «солнечная шестерня – сателлит» и «сателлит – коронная шестерня» под нагрузкой или контролем суммарного пятна контакта в собранной планетарной передаче на специальных стендах с нагрузкой и возможностями фиксации пятна контакта.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 1643–81. (СТ СЭВ 641–77, СТ СЭВ 643–77 и СТ СЭВ 644–77). Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 46 с.
2. Toleranzen für Stirnradverzahnungen. Toleranzen für Flankenlinienabweichungen. DIN 3962. Teil 2.
3. Особенности продольной модификации зубчатых колес планетарных передач типа 2К-Н / В. Е. Антонюк [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3(12). – С. 28–32.
4. Напряженно-деформированное состояние деталей планетарного редуктора схемы 2К-Н / В. Е. Антонюк [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 21–25.
5. Продольная модификация зубчатых передач мобильных машин / В. Е. Антонюк [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 4(17). – С. 37–41.
6. Антонюк В. Е., Поддубко С. Н., Русецкий В. Н. Параметры двухпрофильного контроля при селективной сборке сателлитов планетарных передач схемы 2КН // Труды НАМИ: сборник. – М.: НАМИ, 2015. – Вып. 261. – С. 101–117.
7. Особенности конструкции и технологии изготовления модифицированных зубчатых колес / В. Е. Антонюк [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 3(16). – С. 14–18.

Получено 11.01.2017

УДК 621.396.6

В. В. Козлов, доктор технических наук, профессор, Черноморское ВВМУ имени П. С. Нахимова, Севастополь
Т. В. Зонтова, кандидат технических наук, Черноморское ВВМУ имени П. С. Нахимова, Севастополь

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПЕРВОГО ЭТАПА МЕХАНИЗМА БЫСТРОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

Введение

Формирование мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) наносекундной длительности возможно путем применения быстрого механизма электрического взрыва к проводникам. Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных в работах [1, 2], показал, что дан-

ный механизм реализуется при плотностях тока $j \approx 10^7$ А/см² для электровзрывающихся проводников (ЭВП) диаметром $a_0 \leq 0,1$ мм. Указанными параметрами генерируемого тока обладает спиральный взрывомагнитный генератор (СВМГ), в качестве нагрузки которого и можно использовать ЭВП.

Целью данной работы является исследование временных параметров МЭМИ, формируемых при быстром электрическом взрыве проводников.

Основной материал

Анализ исследований, проведенных в работах [3–5], показал, что основным условием для формирования данного механизма является соотношение времени ввода энергии от импульсного источника питания к электровзрывающемуся проводнику (ЭВП) и интервала времени возникновения гидродинамических неоднородных участков. В этом случае ЭВП резко расширяется, не успев деформироваться, теряет проводимость и превращается в золь [6, 7]. В стадии потери проводимости ЭВП разбивается на поперечные слои конденсированного металла и участки низкой плотности между ними (микроразрывы).

Структурно механизм быстрого электрического взрыва включает несколько этапов (рис. 1), определяющих временные параметры формируемого импульса (длительность фронта и спада).



Рис. 1. Фотографии изменения состояния ЭВП диаметром 0,025 мм и длиной 0,7 см в различные моменты времени взрыва

Первый этап характеризуется началом нагрева проводника при вводе в систему больших плотностей тока вплоть до его перехода в жидкое состояние. Следовательно, длительность первого этапа (фронт импульса) при неизменных размерах ЭВП и заданном начальном токе будет определяться температурой плавления проводника.

На втором этапе, определяющем длительность спада формируемого импульса, сопротивление ЭВП начинает резко возрастать, сохраняя металлический характер до момента времени t^{**} . Кроме того, при $t = t^*$ ЭВП начинает быстро расширяться, так что вблизи момента t^{**} металл оказывается превратившимся в мелкодисперсную массу (золь) с размером частиц меньше 1000^0 А (третий этап) [8].

В качестве импульсного источника питания, выберем спиральный взрывомагнитный генератор (СВМГ), принцип действия которого связан с изменением индуктивности соленоида при взрывном расширении замыкающего элемента (лайнера). Автономная конструкция спиральных ВМГ позволяет

применять их в различных излучающих системах, в том числе и в перспективных образцах электромагнитных боеприпасов [9, 10].

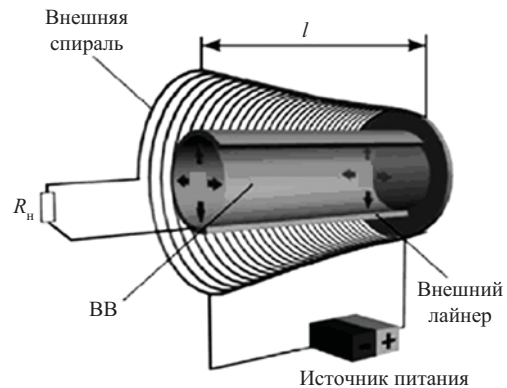


Рис. 2. Модель спирального ВМГ

Спиральные ВМГ являются уникальными источниками получения максимально возможной энергии, им нет альтернативы при проведении многих физических экспериментов [11–13]. Оптимизация параметров спирального ВМГ позволяет получить максимальный коэффициент усиления энергии в индуктивной нагрузке при заданном времени работы.

Данная структура включает в себя источник питания, конический соленоид длиной l (внешнюю проводящую спираль) и металлический лайнер, заполненный взрывчатым веществом (ВВ). Внешняя спираль будет определять основной объем, занимаемый генератором в ограниченных размерах корпуса [14].

Для выбранного СВМГ закон изменения тока на первом этапе электрического взрыва проводника можно записать, учитывая результаты исследований, проведенных в работах [15, 16]:

$$i_L(t) = I_2 R_{ЭВП} \frac{3d^2}{\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K \left(\frac{r_{cp}}{l^*} \right)} \times \left[2 \operatorname{arctgh} \left(\frac{mD(l^* - 2Dt)}{\sqrt{l^* m D^2 (ml^* - 4B(t))}} \right) (2B(t)D - ml^*D) - \frac{\ln \left(\frac{m}{Ml^*} [Dt - B(t)/m - D^2 t^2 / l^*] \right)}{2D} \right], \quad (1)$$

где I_2 – постоянный ток, протекающий в контуре до подрыва взрывчатого вещества (ВВ) в СВМГ; $R_{ЭВП}$ – активное сопротивление ЭВП до начала плавления (первый этап); d – диаметр проволоки соленоида; r_1, r_2 – радиусы витков соленоида в начале и в конце спирали СВМГ соответственно; $l^* = dN^* + kN^*$ –

первоначальная длина соленоида ВМГ; N^* – первоначальное количество витков соленоида СВМГ; k – расстояние между витками СВМГ; $K(r_{cp}/l^*)$ – поправочный множитель; m – масса ВВ; D – скорость детонации ВВ; r_0 – начальный радиус заряда; M – масса расширяющегося элемента СВМГ (лайнера);

$$B(t) = 2Mr_0 \sqrt{16 + \frac{2mD^2 t^2}{Mr_0^2} \frac{r_2 - r_2}{l^* - d}}.$$

Основываясь на (1) и предполагая, что первый этап существует на интервале времени $\tau \leq t < t^*$,

$$B(t) \ll ml^* \text{ и } \frac{D^2 t^2}{l^*} \gg \frac{B(t)}{m} \ll Dt \text{ запишем выра-}$$

жение для энергии, передаваемой от СВМГ к электровзрывающемуся проводнику на первом этапе:

$$W_{ЭВП} = \left[\frac{9I_2^2 R_{ЭВП}^3 d^4}{\mu_0^2 \pi^2 (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)^2 K^2 \left(\frac{r_{cp}}{l^*} \right)} \right] \times \\ \times \left[\tau \ln \left(\frac{mD\tau}{Ml^*} \right) \left(\frac{\pi}{2} - \ln \left(\frac{mD\tau}{Ml^*} \right) + 2 \right) + 4,186(t^* - \tau) - \right. \\ \left. - (t^* \ln \left(\frac{mD\tau}{Ml^*} \right) \left(\frac{\pi}{2} - \ln \left(\frac{mDt^*}{Ml^*} \right) + 2 \right)) \right], \quad (2)$$

где τ – длительность переходного процесса, возникающего при подключении источника питания к СВМГ; t^* – время начала расширения ЭВП (время окончания первого этапа). Выражение (2) получено при условии, что на первом этапе электрического взрыва выполняется условие $R_{ЭВП} = \text{const}$ при $\tau \leq t < t^*$.

На рис. 1 представлены графические зависимости температуры нагрева ЭВП на первом этапе от времени работы СВМГ.

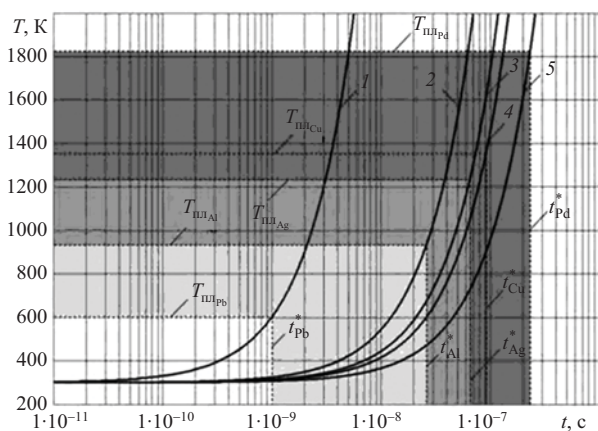


Рис. 1. Зависимости температуры нагрева проводника от времени работы ВМГ для различных материалов ЭВП: 1 – свинец (Pb); 2 – алюминий (Al); 3 – серебро (Ag); 4 – медь (Cu); 5 – палладий (Pd)

Данные зависимости получены для различных материалов ЭВП, обладающих одинаковыми конструктивными характеристиками (длина и диаметр каждого проводника составляли 0,3 м и $0,1 \cdot 10^{-3}$ м соответственно), при которых исключается влияние микроскопических неоднородностей в металле. Параметры СВМГ выбирались из условия, что плотность ввода тока в ЭВП составляла $j \approx 10^8$ А/см² [17].

Зависимости, представленные на рис. 1, показывают, что, варьируя материал проводника, можно изменять длительность первого этапа электрического взрыва, зависящего от времени достижения температуры плавления ЭВП ($T_{пл}$). Кроме выбора материала проводника длительность первого этапа можно варьировать, изменяя площадь сечения ЭВП [18].

На рис. 2 и 3 приведены графические зависимости, характеризующие нагрев свинцовых и палладиевых проводников различного сечения.

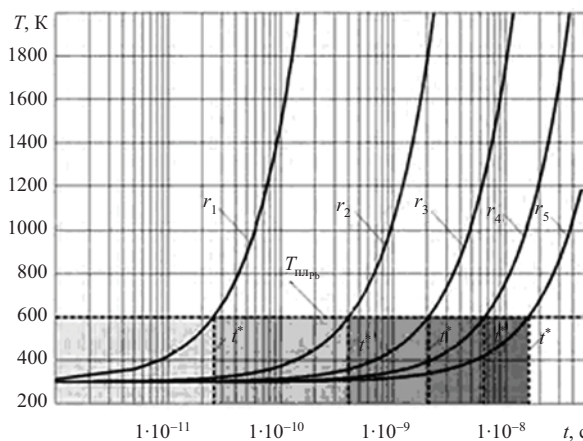


Рис. 2. Зависимости температуры нагрева свинцовых ЭВП различного радиуса от времени работы ВМГ: $r_1 = 0,02 \cdot 10^{-3}$ м; $r_2 = 0,04 \cdot 10^{-3}$ м; $r_3 = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м; $r_4 = 0,08 \cdot 10^{-3}$ м; $r_5 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м

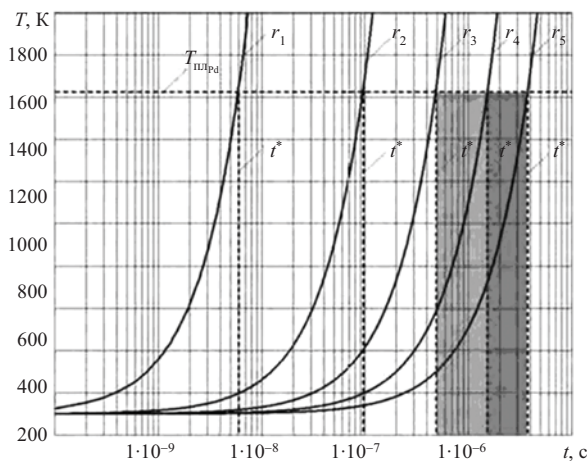


Рис. 3. Зависимости температуры нагрева палладиевых ЭВП различного радиуса от времени работы ВМГ: $r_1 = 0,02 \cdot 10^{-3}$ м; $r_2 = 0,04 \cdot 10^{-3}$ м; $r_3 = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м; $r_4 = 0,08 \cdot 10^{-3}$ м; $r_5 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м

Выводы

Варьируя материал ЭВП, можно изменять длительность первого этапа электрического взрыва от наименьших значений у легкоплавких металлов ($T_{плPb} = 600 \text{ К}$, $t^* \approx 1,1 \text{ нс}$) до наибольших у тугоплавких ($T_{плPb} = 1825 \text{ К}$, $t^* \approx 0,23 \text{ мкс}$).

При неизменном выборе материала ЭВП путем варьирования площадью сечения можно менять в определенных пределах длительность первого этапа электрического взрыва как для легкоплавких ($2,7 \cdot 10^{-11} \leq t^* \leq 1,8 \cdot 10^{-8}$), так и для тугоплавких ($6 \cdot 10^{-9} \leq t^* \leq 3,8 \cdot 10^{-6}$) металлов.

Выбор площади сечения ЭВП будет ограничен предельным значением радиуса $r_0 \leq 0,1 \text{ мм}$, превышение которого будет приводить к появлению микроскопических неоднородностей на первом этапе электрического взрыва [19–21].

Длина электровзрывающегося проводника из-за металлического характера проводимости электровзрывающегося проводника на первом этапе, будет оказывать влияние только при достаточно высоких значениях (сотни метров).

Библиографические ссылки

1. Лебедев С. В., Савватимский А. И. Металлы в процессе быстрого нагрева электрическим током большой плотности // *Успехи физических наук*. – Т. 144, вып. 2. – 1984. – С. 215–250.
2. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких проволочек. – Ч. 1 / Г. В. Иваненков, С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко [и др.]. – М. : ФИАН, 2004. – 26 с.
3. Бурцев В. А., Калинин И. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 342 с.
4. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек. – Ч. 1. Основные процессы электрического взрыва проводников в вакууме / Г. В. Иваненков, С. А. Пикуз [и др.]. – М. : РФЯЦ ВНИИТФ им. Забабахина, 2004. – 26 с.
5. Расчеты и эксперименты по наносекундному электрическому взрыву тонких проволочек / Р. Б. Бакшт, И. М. Дацко [и др.] // *Физика плазмы*. – 1983. – Т. 9, вып. 6. – С. 1224–1230.
6. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек.
7. Расчеты и эксперименты по наносекундному электрическому взрыву тонких проволочек.
8. Лебедев С. В., Савватимский А. И. Указ. соч.
9. Кучер Д. Б., Зонтова Т. В. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора // *Збірник наукових праць Академії ВМС імені П. С. Нахімова*. – Севастополь : АВМС імені П. С. Нахімова. – 2012. – Вип. 1(9). – С. 130–135.
10. Кучер Д. Б., Зонтова Т. В. Особенности применения спиральных взрывомагнитных систем в конструкциях ограниченного объема // *Системы вооружения и военная техника*. – Харьков : ХУВС им. Ивана Кожедуба, 2011. – Вып. 2(26). – С. 65–68.
11. Кравченко В. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1987. – 256 с.
12. Прицпенко А. Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 208 с.
13. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В. Е. Фортова. – М. : Наука, 2002. – 399 с.
14. Кучер Д. Б., Зонтова Т. В. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора.
15. Там же.
16. Кучер Д. Б., Тараненко С. В., Бусяк Ю. М. Особенности генерирования мощных электромагнитных помех спиральным взрывомагнитным генератором // *Системы обработки информации*. – Харьков : ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2009. – Вип. 4(78). – С. 86–90.
17. Бурцев В. А., Калинин И. В., Лучинский А. В. Указ. соч.
18. Кучер Д. Б., Зонтова Т. В. Исследование временных параметров импульсных воздействий, формируемых при быстром электрическом взрыве проводников // *Системы обработки информации. Информационные проблемы акустических, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем*. – Харьков : ХУВС им. Ивана Кожедуба, 2013. – Вып. 7(114). – С. 43–48.
19. Бурцев В. А., Калинин И. В., Лучинский А. В. Указ. соч.
20. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек.
21. Расчеты и эксперименты по наносекундному электрическому взрыву тонких проволочек.

Получено 28.01.2017