

Література

1. Новосядлий, С. П. Суб–наномікрона технологія структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано–Франківськ: Місто НВ, 2010 – 456 с.
2. Новосядлий, С. П. Фізико–технологічні основи субмікронної технології ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано–Франківськ: Сімік, 2003. – С. 52–54.
3. Симонов, В. В. Оборудование ионной имплантации [Текст] / В. В. Симонов, Л. В. Корнилов. – М.: Радио и связь, 1988. – 354 с.
4. Риссел, Х. Ионная имплантация [Текст] / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
5. Болтакс, Б. И. Глубокие центры в GaAs, связание с собственными структурными дефектами [Текст] / Б. И. Болтакс, М. Н. Колотов, Е. А. Скоретина. – Известия вузов. Физика, 1983. – 10 с.
6. Афанасев, В. А. Оборудование для импульсной термообработки полупроводниковых материалов [Текст] / В. А. Афанасев, М. П. Духвський, Г. А. Красов. – Электроника СВЧ, 1984. – С. 56–58.
7. Окамото, Т. Устройства ионной имплантации [Текст] / Т. Окамото. – Саймицу кикай, 1985. – С. 1322–1325.
8. Черилов, А. В. Исследование электрофизических характеристик ионно–легированных слоев GaAs [Текст] / А. В. Черилов. – Электронная техника, 1984. – С. 8–12.
9. Ди Лоренцо, А. В. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления [Текст] / А. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола; пер с англ. под ред. Г. В. Петрова. – М.: Радио и связь, 1988 – 489 с.
10. Ватанаба, Н. Проектирование СВИС [Текст] / Н. Ватанаба, К. Асада, К. Кани, Т. Оцуки; пер с англ.; под ред. Л. В. Поспелова. – М.: Мир, 1988 – 304 с.

Зроблено аналіз розподілу густини струму в електродах електрохірургічних інструментів при зварюванні біологічних м'яких тканин. Для цього розроблено алгоритм розв'язання та розв'язана еліптична задача, що моделює скін-ефект в провідниках компактного перерізу. Проведена верифікація математичної моделі розподілу густини струму в монополярному електроді шляхом порівняння з експериментальними даними при хірургічній операції приварювання сітківки ока до його судинної оболонки

Ключові слова: зварювання біологічних м'яких тканин, електрохірургічні інструменти, електроди, високочастотний струм, скін-ефект

Сделан анализ распределения плотности тока в электродах электрохирургических инструментов при сварке мягких биологических тканей. Для этого разработан алгоритм решения и решена эллиптическая задача, моделирующая скин-эффект в проводниках компактного сечения. Проведена верификация математической модели распределения плотности тока в монополярном электроде путем сравнения с экспериментальными данными при хирургической операции приваривания сетчатки глаза к его сосудистой оболочке

Ключевые слова: сварка мягких биологических тканей, электрохирургические инструменты, электроды, высокочастотный ток, скин-эффект

УДК 615.47:621.791

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43372

РОЗПОДІЛ СТРУМУ В ЕЛЕКТРОДАХ ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

В. М. Сидорець

Доктор технічних наук, професор
провідний науковий співробітник*

E-mail: sydorvn@gmail.com

А. Г. Дубко

Кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник*

E-mail: andredu@yandex.ru

*Інститут електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України

вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

1. Вступ

Високочастотний струм в сучасній електрохірургії застосовують в багатьох галузях загальної хірургії, кардіології, офтальмології, урології, отоларингології, гінекології, онкології і т. д. [1, 2]. З 1994 року в Інсти-

туті електрозварювання ім. Є. О. Патона в співпраці хірургами ведуться роботи по створенню нових технологій та обладнання для високочастотного зварювання живих м'яких тканин [3].

Протікання через провідник змінного струму супроводжується скін-ефектом, який полягає в неоднорідному

розподілі густини струму по його перерізу. Густина найбільша біля його поверхні і зменшується з глибиною. При дуже великих частотах струм протікає практично тільки в тонкому поверхневому шарі і всередині досить товстого провідника струм високої частоти не тече. Чисельне моделювання поширення електромагнітного поля та густини струму через електроди електрохірургічних інструментів дозволяють проаналізувати вплив скін-ефекту на форму та якість зварного з'єднання. При цьому чисельне моделювання ефективніше аналітичних методів розв'язку.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Технологія зварювання біологічних м'яких тканин знаходить широке застосування в багатьох областях хірургії [4]. Разом з вдосконаленням цієї технології іде створення нових електрохірургічних інструментів [5, 6] і хірургічних методик [7, 8]. Загальної теорії проходження змінного струму через циліндричний провідник присвячена робота [9], але в ній йдеться про розробку вимірювальних приладів на низьких частотах. В роботі [10] математично моделюється проходження струму при електрохірургічних втручаннях, але модель не враховує дію скін-ефекту.

Наглядно дія скін-ефекту проявляється при приварюванні відшарованої сітківки до судинної оболонки ока. Ця робота проводиться в Інституті очних хвороб і тканинної терапії ім. В. П. Філатова АМН України спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона [11]. Під мікроскопом видно місця проходження струму – коагуляційні кільця (рис. 1), які утворюються при контактному зварюванні сітківки ока. Зовнішній діаметр цих кілець трохи більший за діаметр монополярного активного електроду, а внутрішній діаметр буває різним і залежить від умов проведення операції та параметрів електричного струму. Електрохірургічний інструмент для приварювання сітківки показано на рис. 2.

Електрофізичні характеристики провідних середовищ (електродів електрохірургічних інструментів) визначаються їх питомою електропровідністю σ , діелектричною ϵ і магнітною μ проникністю. Змінне електромагнітне поле описується рівнянням [12]

$$-\nabla\left(\frac{1}{\mu}\nabla E\right) + (j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)E = 0, \quad (1)$$

де ∇ – оператор набла; E – напруженість електромагнітного поля; ω – кутова частота; j – уявна одиниця. Це рівняння витікає з рівнянь Максвелла.



Рис. 1. Коагуляційні кільця на сітківці після операції приварювання її до судинної оболонки ока



а



б

Рис. 2. Електрохірургічний інструмент для приварювання сітківки ока: а – зовнішній вигляд; б – збільшене зображення електроду

Розробка адекватної математичної моделі проходження змінного високочастотного струму при електрохірургічних втручаннях, яка буде підтверджена експериментальними даними дозволить виконувати проектування оптимальних форм електродів для різних областей електрохірургії з урахуванням скін-ефекту в широкому частотному діапазоні.

3. Мета та задачі дослідження

Аналіз розподілу густини струму в електродах з допомогою математичного моделювання фізичних процесів було метою даної роботи.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розробити алгоритм розв'язання еліптичної задачі для моделювання скін-ефекту в провідниках;
- провести чисельні розрахунки протікання високочастотного струму в круглих електродах електрохірургічних інструментів в середовищі математичного пакета Matlab.

4. Матеріали та методи математичного моделювання розподілу густини змінного струму в монополярному круглому електрохірургічному електроді

Експеримент реалізовано для мідного провідника ($\sigma=57 \cdot 10^6$ См/м). Поперечний переріз мідного електроду, що розглянутий в експерименті є компактними, оскільки до компактних перетинів відносяться суцільні перетини з відношенням сторін, близьким до одиниці а ідеально компактним перерізом є коло.

Моделювання здійснювалось в пакеті Matlab з допомогою методу кінцевих різниці.

5. Математична модель для ідеального компактного перерізу

У випадку нескінченного круглого циліндра (циліндрична система координат), якщо його вісь збігається з координатою z, то густина струму в будь-якій точці циліндра залежить тільки від координат x і y. В будь-якій точці циліндра, яка відступає на відстань r від осі циліндра, густина струму буде одна і та ж. Поверхні рівної густини струму являють собою циліндричні поверхні, які коаксіальні до поверхні циліндра. Між радіальною координатою r і координатами x і y існує зв'язок

$$r^2 = x^2 + y^2. \tag{2}$$

Рівняння (1) в межах електроду (0 < r < R, де R – радіус електроду) для циліндричної системи координат прийме вигляд

$$-\frac{1}{\mu \cdot r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + (j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)E = 0. \tag{3}$$

Далі для ізотропного середовища і одновимірної стаціонарної задачі з урахуванням граничних умов в циліндричній системі координат в результаті апроксимації частинних похідних відповідними кінцевими різницями, на рівномірній лінійці було складено систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Вирішивши цю систему рівнянь отримали розподіл напруженості електромагнітного поля E вздовж радіальної координати r. Розподіл густини струму вздовж r отримали використавши формулу

$$J = E \cdot \sigma, \tag{4}$$

де J – густина струму.

Граничні умови в розглянутій задачі: на лівій границі умова другого роду (Неймана)

$$\left. \frac{\partial E}{\partial r} \right|_{r=0} = 0;$$

на правій границі умова першого роду (Діріхле)

$$E_{r=R} = J/\sigma.$$

З граничних умов та рівняння (3) отримуємо СЛАР в матричній формі

$$Ae = b, \tag{5}$$

де A – матриця коефіцієнтів системи, e – вектор-стовбець невідомих, b – вектор-стовбець правих частин рівнянь (вільних членів).

До систем лінійних рівнянь зводиться велика кількість задач математики. СЛАР має єдиний розв'язок, якщо матриця A є несингулярною, тобто визначник не рівний нулю.

Існують основні методи рішення СЛАР: метод Крамера, метод Гаусса, метод оберненої матриці.

Вирішення СЛАР з великою матрицею A в математичному пакеті Matlab за допомогою методу оберненої матриці, з обчислювальної точки зору, труднощів не становить. Тому в вирішенні задачі обчислення розподілу напруженості електромагнітного поля вздовж радіальної координати використано метод оберненої матриці

$$e = bA^{-1}, \tag{6}$$

де A⁻¹ – зворотна матриця.

Алгоритм вирішення задачі представлено на рис. 3.

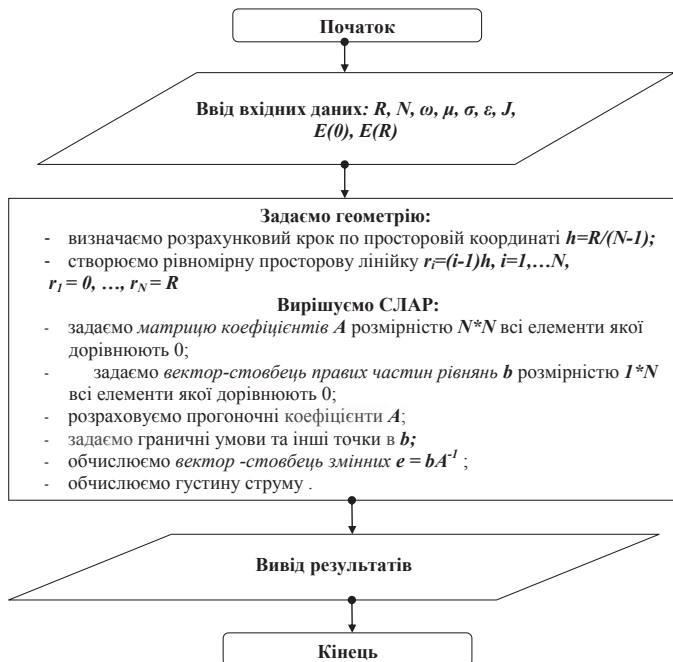


Рис. 3. Алгоритм вирішення задачі (N – кількість точок по довжині просторової лінійки, E(0) – ліва гранична умова, E(R) – права гранична умова)

На рис. 4 показано результат математичного моделювання, в пакеті Matlab, розподілу густини струму в мідному електроді. Основні вхідні дані моделі взяті з реальних даних експериментів по приварюванню сітківки ока: радіус електроду 0,33 мм; частота 66 кГц.

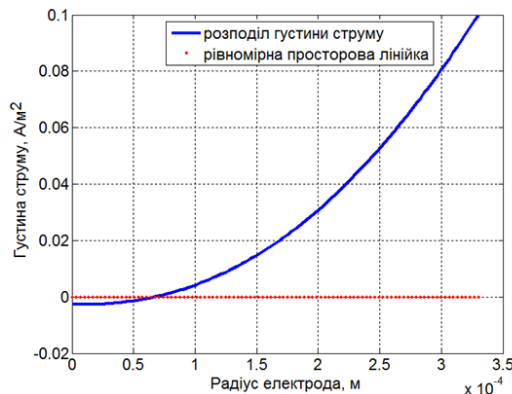


Рис. 4. Розподіл густини струму в мідному круглому електроді (частота 66 кГц)

На рис. 5 показано розподіл густини струму в мідному електроді (радіус електроду 0,33 мм; частота 1 МГц).

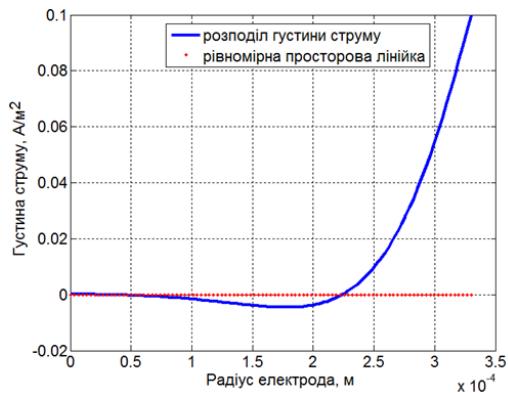


Рис. 5. Розподіл густини струму в мідному круглому електроді (частота 1 МГц)

6. Обговорення результатів дослідження впливу скін-ефекту на розподіл густини змінного струму

Математична модель показує, що всередині круглого електрода струм високої частоти майже не тече і цим пояснюється утворення коагуляційних кілець в практичних дослідженнях по контактному приварюванню сітківки ока. При збільшенні частоти струму скін-ефект виражається в зменшенні товщини поверхневого шару по якому проходить змінний струм.

Розроблена математична модель по визначенню товщини скін-шару може застосовуватись для круглих провідників з різною електропровідністю (мідь, срібло, золото, алюміній, латунь та інш.) в широкому частотному діапазоні від 50 Гц (частота мережі живлення) до верхньої межі роботи високочастотних електрохірургічних джерел живлення – 4 МГц.

Подальшим розвитком даного дослідження стане – розробка математичних моделей розподілу густини

струму в активних та пасивних електродах з складною формою поперечного перерізу, які широко застосовуються в електрохірургії при зварюванні живих тканин. Для вирішення цих задач буде використано метод стрільби.

7. Висновки

1. Розроблена математична модель розподілу густини струму в електродах електрохірургічних інструментів з компактним поперечним перерізом дозволяє аналізувати електромагнітні процеси, що відбуваються при електрохірургічних втручаннях. Ця модель представляє собою одномірну еліптичну задачу для моделювання скін-ефекту в провідниках.

На відміну від існуючого погляду, що дію скін-ефекту можна не враховувати при моделюванні роботи електрохірургічних електродів, ця модель показує, що розподіл густини струму в електродах є важливою складовою процесу високочастотного впливу на біологічні тканини.

2. Процедуру верифікації розробленої моделі найпростіше проводити порівнянням з результатами експериментальних досліджень по приварюванню сітківки ока.

3. Зміною частоти струму в електродах можна впливати на ширину коагуляційного кільця і вирішувати задачу його оптимізації, оскільки занадто велика ширина кільця призводить до більш травматичного перебігу операції, а занадто мала – не забезпечує якість та міцність зварного з'єднання.

Подяки

Автори висловлюють подяку доктору біол. наук, проф., завідувачу кафедри медичної кібернетики НТУУ «КПІ» Є. А. Настенко, за надану можливість виконати математичне моделювання в пакеті Matlab версії 6.5.

Література

1. Драбкин, Р. Л. Аппарат для высокочастотной электрохирургии ЭН-57-М [Текст] / Р. Л. Драбкин, Г. В. Матюхин, А. П. Подобед // Медицинская техника. – 1976. – № 1. – С. 47–49.
2. Долецкий, С. Я. Высокочастотная электрохирургия [Текст] / С. Я. Долецкий, Р. Л. Драбкин, А. И. Ленишкин. – Москва: Медицина, 1980. – 198 с.
3. Патон, Б. Е. Электрическая сварка мягких тканей в хирургии [Текст] / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2004. – № 9. – С. 7–11.
4. Лебедев, А. В. Особенности применения теории контактной сварки металлов к сварке живых тканей [Текст] / А. В. Лебедев, А. Г. Дубко // Технічна електродинаміка. – 2012. – Вип. 2. – С. 187–192.
5. Патент 29797 Україна. Інструмент для біполярної високочастотної коагуляції живих м'яких тканин тварин і людини [Текст] / Патон Б. Є., Лебедев В. К., Лебедев О. В., Васильченко В. А., Макаров В. А., Мясніков Д. В., Трунов А. Є. – Пріор. від 10.10.2007; Опубл. 25.01.2008.
6. Pat. 2007/0276363 A1. Instrument and method for the end-to-end reconnection of intestinal tissues [Text] / Paton B. E., Lebedev V. K., Furmanov Yu. A. et. al. / Publ. Date: Nov.29, 2007.
7. Патент 36225 Україна. Спосіб хірургічного лікування геморою черезслизово [Текст] / Подпратов С. С. – Опубл. 27.10.2008; Бюл. № 20.
8. Божко, Н. В. Технологія електрозварювання при виконанні функції резекції гортані [Текст] / Н. В. Божко // Укр. наук.-мед. молод. журн. – 2008. – № 3. – С. 465.
9. Глухенький, А. И. Расчетная оценка составляющих импеданса цилиндрического проводника при их измерении на переменном токе [Текст] / А. И. Глухенький, А. А. Михаль // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 15–22.
10. Suarez, A. G. Mathematical modeling of epicardial RF ablation of atrial tissue with overlying epicardial fat [Text] / A. G. Suarez, F. Hornero, E. J. Berjano // The Open Biomedical Engineering Journal. – 2010. – Vol. 4, Issue 1. – P. 47–55. doi: 10.2174/1874120701004010047

11. Уманец, Н. Н. Ультраструктурные изменения сосудистой оболочки и сетчатки глаза кролика непосредственно после воздействия различных режимов высокочастотной электросварки биологических тканей [Текст] / Н. Н. Уманец, В. А. Науменко, Н. Е. Думброва, Н. И. Молчанюк, Р. Э. Назаретян // Журнал НАМН Украины. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 359–364.
12. Popovic, Z. Introductory Engineering Electromagnetics [Text] / Z. Popovic, B. D. Popovic // Prentice Hall, 1999. – 548 p.

Проведено моделювання зміни енергії сигналів акустичної емісії при механічній обробці композиційного матеріалу в залежності від його властивостей для механічної моделі акустичного випромінювання. Показано, що зростання значення параметру, який характеризує властивості матеріалу, приводить до падіння енергетичних характеристик акустичної емісії. Визначено, що падіння дисперсії середнього рівня енергії випереджає падіння інших енергетичних та амплітудних параметрів акустичної емісії

Ключові слова: акустична емісія, композиційний матеріал, сигнал, амплітуда, механічна обробка, властивості матеріалу

Проведено моделирование изменения энергии сигналов акустической эмиссии при механической обработке композиционного материала в зависимости от его свойств для механической модели акустического излучения. Показано, что возрастание значения параметра, характеризующего свойства материала, приводит к падению энергетических характеристик акустической эмиссии. Определено, что падение дисперсии среднего уровня энергии опережает падение других энергетических и амплитудных параметров акустической эмиссии

Ключевые слова: акустическая эмиссия, композиционный материал, сигнал, амплитуда, механическая обработка, свойства материала

УДК 620.179:534.6
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43733

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АМПЛИТУДНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО КОМПОЗИТА

С. Ф. Филоненко

Доктор технических наук, профессор, директор
Институт информационно-диагностических систем
Национальный авиационный университет
пр. Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058
E-mail: fils01@mail.ru

1. Введение

Работоспособность изделий из композиционных материалов (КМ) в значительной степени определяется неоднородностью их свойств. Такая неоднородность обусловлена процессами изготовления КМ. Для обеспечения надёжности изделий проводят широкий комплекс исследований с разработкой методов контроля и мониторинга, как КМ, так и технологических процессов их механической обработки. Одним из методов исследований является метод акустической эмиссии (АЭ). Однако при значительных преимуществах метода его применение для контроля технологических процессов механической обработки КМ ограничено. Это обусловлено проблемами интерпретации регистрируемого акустического излучения.

Результаты опубликованных исследований показывают, что сигналы АЭ, регистрируемые в процессе механической обработки КМ, формируются при действии влияющих факторов. Такими факторами являются: технологические параметры механической обработки КМ; физико-механические характеристики обрабаты-

ваемого КМ. Они определяют сложную форму и параметры сигналов АЭ, которые изменяются во времени. Безусловно, что интерпретация их изменения является важной задачей для разработки методов контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ. Одним из направлений решения задачи является моделирование АЭ с определением влияния различных факторов на амплитудно-энергетические параметры формируемых сигналов. Это позволит определить информативность и чувствительность параметров АЭ к действию влияющих факторов, что является основой создания методов контроля механической обработки КМ и качества изготавливаемых изделий.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Метод АЭ, как показывают обзорные публикации [1–3], имеет широкое применение при исследовании различных операций механической обработки материалов (точение, сверление, фрезерование), включая и