



DOI: 10.6084/m9.figshare.17085776

LCC - № RD32-33.9

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ ПРИ СВАРКЕ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ

А. В. Лебедев¹, А.Г. Дубко^{1,2} О. Ф. Бондаренко¹,

¹ Национальный технический университет «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

² Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

Адрес для переписки: Лебедев Алексей Владимирович, д.т.н. профессор кафедры биомедицинской инженерии Национального технического университета «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, ул. Янгеля, 16/2, biowelding@gmail.com

Анотація. Електрозварювання живих тканин застосовується майже у багатьох областях у хірургії. Зменшуються час операції, втрати крові, ймовірність післяопераційних ускладнень. Її зручно використовувати там, де складно чи не можна використовувати нитки, кліпси, дужки. Зварювання провадиться на частотах від 100 кГц до 15 МГц. На високих частотах відбувається витіснення струму поверхні провідника. Це називається поверхневим або скін-ефектом. Нерівномірний розподіл струму в біологічній тканині при зварюванні може спричинити утворення дефектів у зварному шві. Комп'ютерне моделювання дозволяє визначити щільність струму, напруженість електричного поля, температуру тканини при

зварюванні з урахуванням поверхневого ефекту. Комп'ютерне моделювання проводилося серед MATLAB і SolidWorks. Моделювання в MATLAB дозволяє повніше врахувати всі особливості процесів. Моделювання в SolidWorks зручно використовувати при конструюванні електрозварювальних інструментів, розробки технологій зварювання, тому що створення технічної документації, механічне, електромагнітне та теплове моделювання виробляються в одному середовищі. У статті наведено огляд літератури з моделювання поверхневого ефекту при зварюванні живих тканин. Для зменшення впливу поверхневого ефекту використовуються інструменти із спеціальною

формою електродів. Мінімальна товщина тканини, що зварюється, може становити десятки мікрон. Тому значний вплив на щільність струму має також ефект близькості електродів. Найменші щільності струмів усередині електродів та тканини та на кінці електродів. Максимальні щільності струмів більші за мінімальні в 10 разів. Це викликано дією скін-ефекту та ефекту близькості. Максимальна температура всередині тканини в кілька разів перевищує мінімальну температуру на краях електродів. Результати дослідження можуть бути корисними при проектуванні обладнання, інструментів та технологій зварювання живих тканин. Комп'ютерне моделювання дозволяє у багатьох випадках відмовитися від експериментів на піддослідних тваринах та прискорює дослідження та проектування обладнання.

Abstract. Electric welding of living tissue is used in almost many areas of surgery. The operation time, blood loss, and the likelihood of postoperative complications decrease. It is convenient to use it where it is difficult or impossible to use threads, clips, staples. Welding is carried out at frequencies from 100 kHz to 15 MHz. At high frequencies, the current flows on the surface of the conductor. This phenomenon is called surface or skin effect. Uneven distribution of current in biological tissue during welding can cause defects in the weld. Computer simulation

makes it possible to determine the current density, electric field strength, tissue temperature during welding, considering the surface effect. Computer simulation was carried out in MATLAB and SolidWorks environments. Modeling in MATLAB allows you to more fully consider all the features of the processes. Modeling in SolidWorks is convenient to use in the design of electric welding tools, the development of welding technologies, because the creation of technical documentation, mechanical, electromagnetic, and thermal modeling are performed in the same environment. The article provides a review of the literature on modeling the surface effect when welding living tissues. To reduce the influence of the surface effect, tools with a special shape of the electrodes are used. The minimum thickness of the tissue to be welded can be tens of microns. Therefore, the effect of the proximity of the electrodes also has a significant effect on the current density. The lowest current densities are inside the electrodes and tissue and at the end of the electrodes. The maximum current densities are 10 times higher than the minimum ones. This is due to skin and proximity effects. The maximum temperature in the middle of the tissue is several times higher than the minimum temperature at the edges of the electrodes. The research results can be useful in the design of equipment, tools, and technologies for welding living tissues. Computer simulation allows, in many cases, to abandon experiments on experimental animals and speeds up research and

Ключевые слова: сварка живых тканей, поверхностный, эффект близости.

Keywords: living tissue welding, superficial, skin, proximity effects.

Section: Biotechnology/Clinical Engineering

Введение. Электросварка применяется в хирургии для разрезания, гемостаза и соединения живых тканей. В Институте электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины (ИЭС) этот метод начал изучаться совместно с медицинскими организациями с 1992 г [1-2]. Ткань сжимается электродами и через неё пропускается высокочастотный ток (Рис 1).

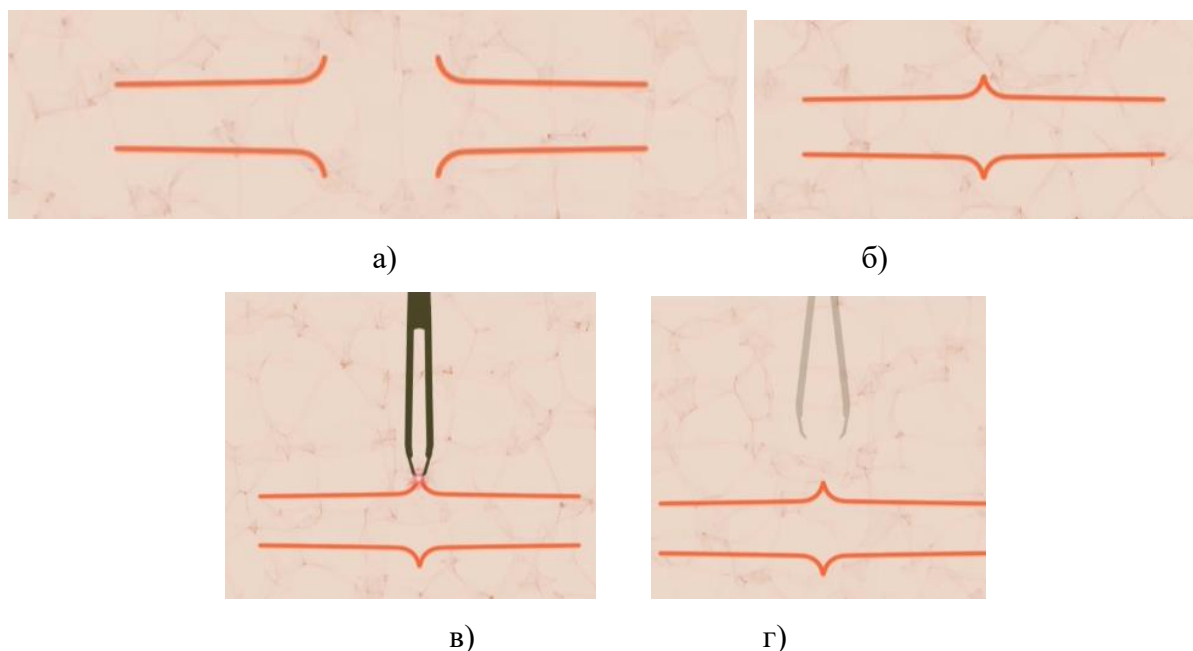


Рис. 1. Последовательность точечной контактной сварки кишки пинцетом: а) разрезанная кишка; б) сведение участков; в) сварка; г) окончание сварки

Под воздействием температуры и электрического поля происходят изменения, которые приводят к образованию сварочного соединения. В месте сварки наблюдается тесное соединение и сплавление мышечных и коллагеновых волокон. Образуется биоклей, увеличивающий прочность сварки [4].

Для сварки используются различные инструменты. Точечная контактная сварка осуществляется пинцетами (Рис.2) [5]. В результате сварки образуется соединение размером до 2–3 мм. Между точками остаётся неповреждённая ткань, которая быстро срастается.

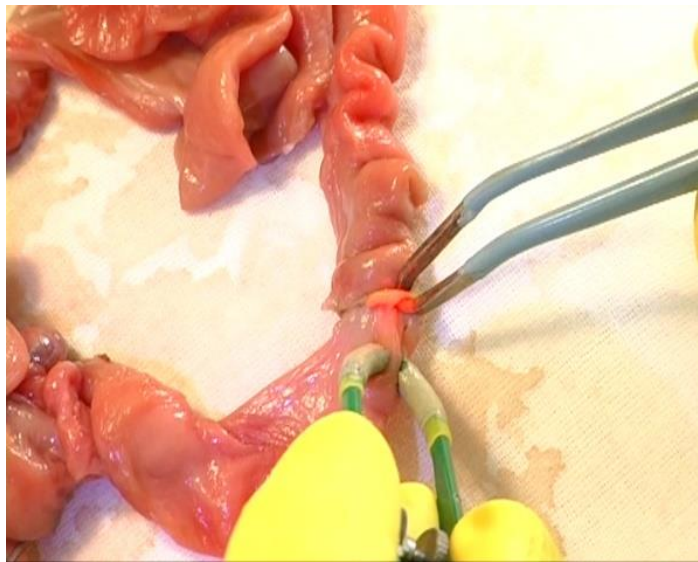


Рис.2. Контактная сварка кишки пинцетом

Увеличение размеров сварного шва возможно при сварке специализированными зажимами (Рис.3).



Рис. 3. Сварка специализированным зажимом аппендикса перед его удалением

Если уменьшить ширину электродов зажима и увеличить напряжение, то увеличивается плотность тока и напряженность электрического поля в ткани и ее температура. Вместо сварки будет происходить бескровное разрезание ткани с одновременным гемостазом (Рис.) [6].

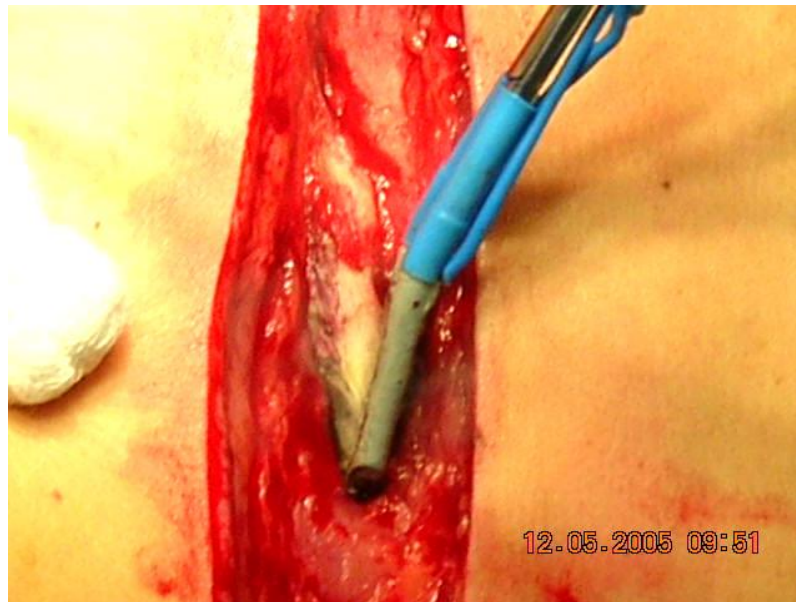


Рис.4. Рассечение мышц грудной стенки сварочным зажимом создает гемостаз сосудов и капилляров.



Рис. 5. Отсутствие кровотечения после окончания рассечения грудной стенки

Ускорить выполнение и повысить герметичность сварного анастомоза можно с помощью одномоментной стыковой сварки. Инструмент вставляется внутрь кишки и содержит два цилиндрических электрода, на которых одевается отрезки кишки. Затем электроды сжимают ткань и на них подаётся высокочастотное напряжение (Рис.6) [7].

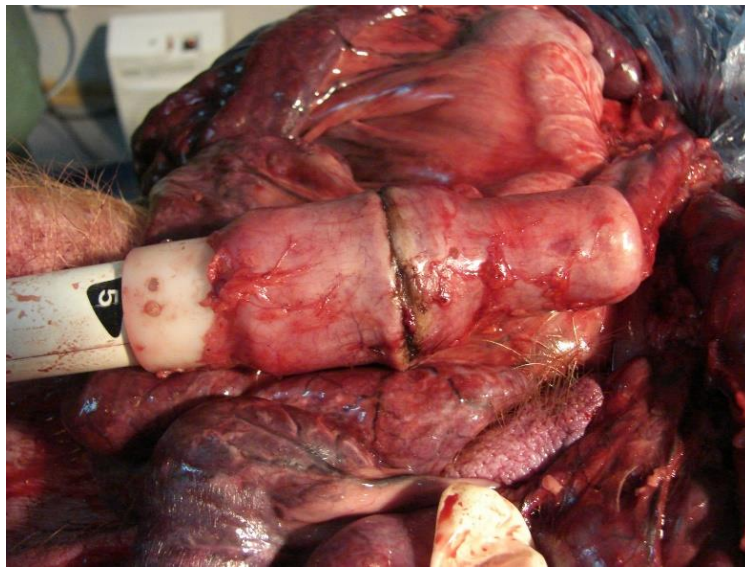


Рис. 6. Одномоментная стыковая сварка кишечника свиньи.

Время выполнения сварки существенно меньше, а герметичность в 1,5–2 раза выше, чем при сшивании нитками или степлером (Рис.7) [8-9].



Рис. 7. Проверка герметичности одномоментного сварочного анастомоза свиньи методом гидрокомпрессии во время демонстрации сварки в США в 2004 г.

Сварка применяется в микрохирургии для соединения нервов, сосудов, приварки сетчатки (Рис. 8) [10-11].

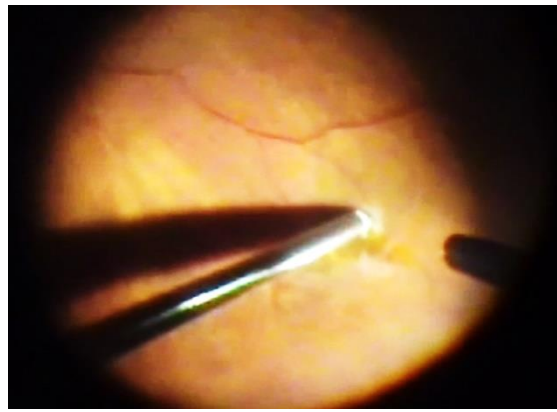


Рис. 8. Приварка сетчатки при операции по устранению ее отслоения от других оболочек глаза. Диаметр электрода с диаметром 0,8мм.

Материалы и методы исследования. Форма, размеры электродов и частота сварочного напряжения изменяются в широких пределах для различных способов сварки. В этих случаях большое влияние на плотность тока в электродах и ткани оказывает поверхностный (скин) эффект.

Разработанные в среде MATLAB математические модели сварки показывают, что при увеличении частоты происходит уменьшение толщины слоя, по которому проходит ток [12-13]. Увеличить площадь электрода с током, можно за счет изменения его формы (Рис. 9-10) [14].

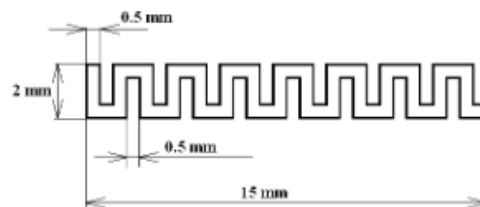


Рисунок 9. Электрод с увеличенной длиной периметра.

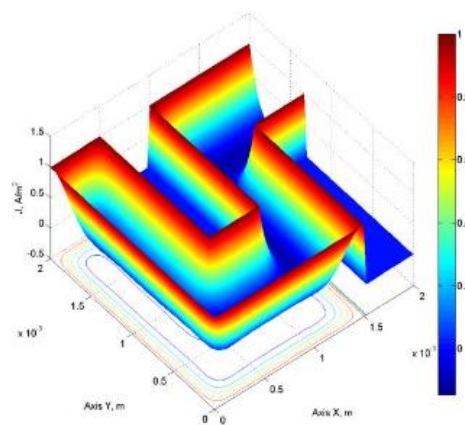


Рис. 10. Распределение плотности тока в электроде с увеличенным периметром на частоте 300 кГц.

Моделирование в MATLAB позволяет определить плотность тока, напряженность электрического поля и температуру электродов и биологической ткани (Рис. 9) [15-16].

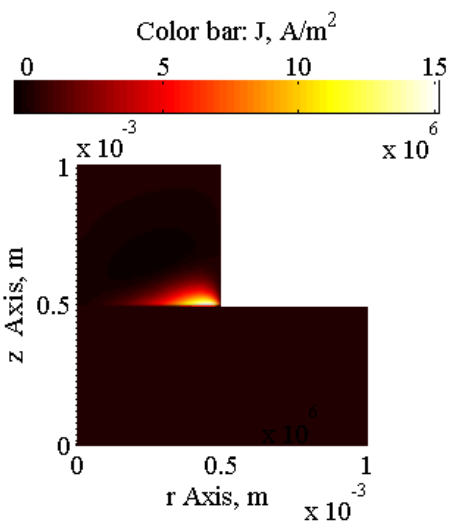


Рис. 11. Плотность тока при приварке сетчатки на частоте 66 кГц (Рис.8)

При разработке сварочных инструментов используется система 3D проектирования SolidWorks, в которой возможно моделирование механических, электромагнитных, тепловых процессов и поверхностного эффекта и эффекта близости. Встроенная библиотека материалов содержит электрические и теплофизические параметры основных органов человека на различных частотах [17-18].

В качестве примера промоделируем в SolidWorks сварку и резку зажимом (Рис. 3-5, 12).

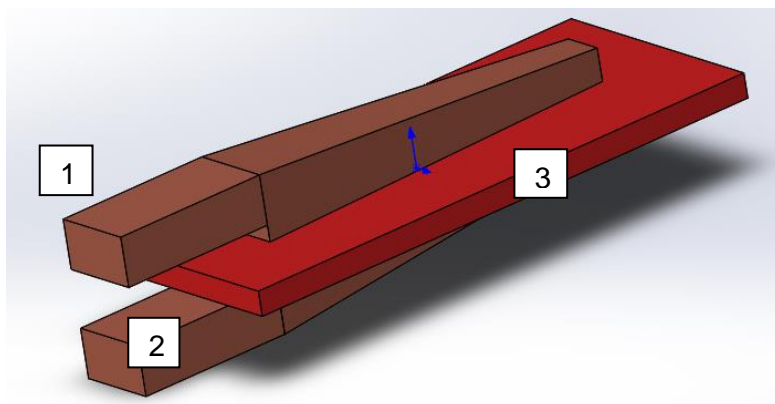


Рис. 12. 3D модель сварки зажимом; 1 и 2 – электроды, 3 – биологическая ткань.

Сварочное напряжение имеет частоту 500 кГц. Наибольшая плотность тока $2,4 \text{ e}+6 \text{ A/m}^2$ на внутренней поверхности бранши инструмента. Наименьшие плотности токов внутри электродов и ткани и на конце электродов. Это вызвано действием скин-эффекта и эффекта близости (Рис.13-14.).

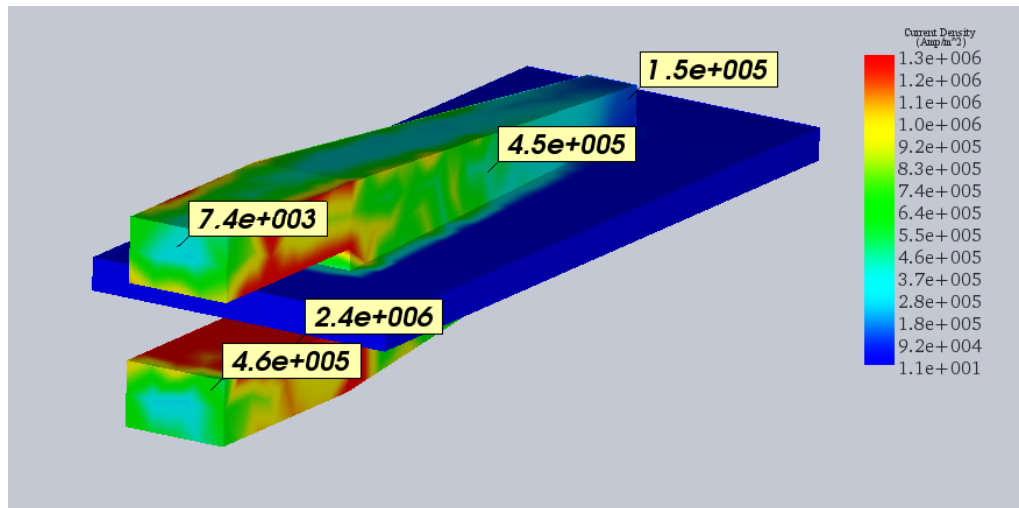


Рис. 13. Плотности тока в торце и на поверхностях электродов и ткани.

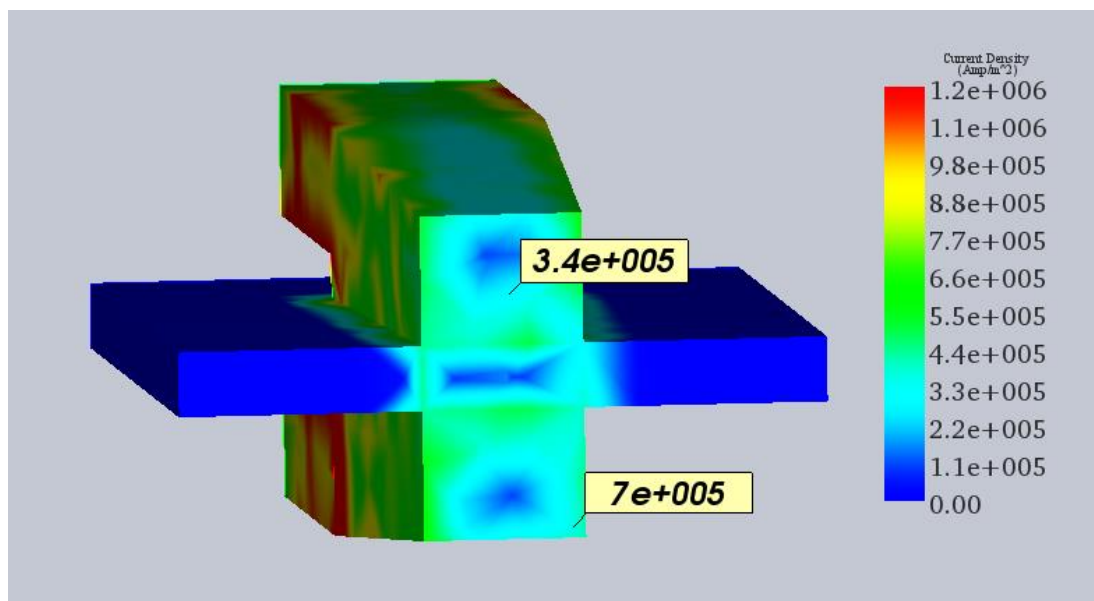


Рис.14. Плотности токов внутри электродов и ткани.

Наибольшая температура внутри ткани в несколько раз больше, чем по краям электродов (Рис. 15). Электроды охлаждают ткань и в конце сварки нагреваются от 20 С до 80 С.

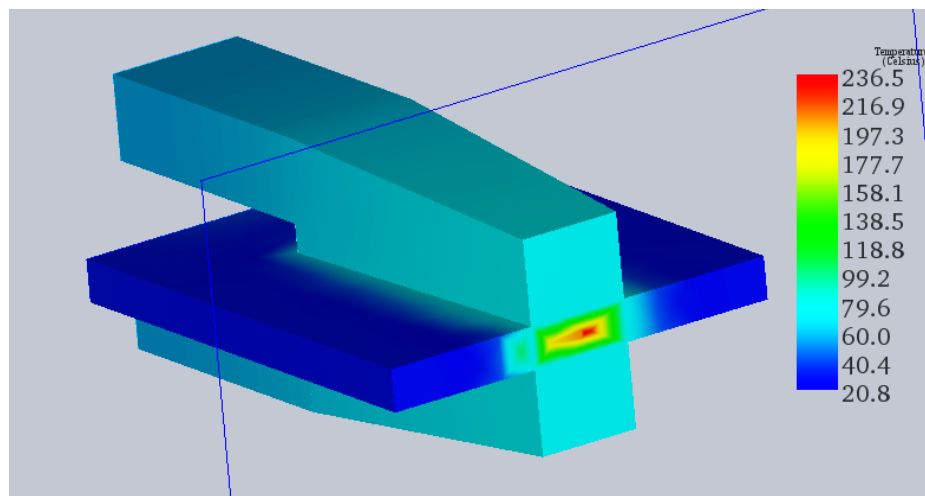


Рис. 15. Температура внутри электродов и ткани в конце сварки.

Если сразу же после первой сварки, начать вторую сварку, то нагрев электродов может превысить 100 С, что вызовет ожог поверхностного слоя ткани. Для предотвращения перегрева необходимо использовать автоматическое регулирование сварки, которое обеспечивает постоянное качество шва в независимости от интервалов между сварками [19-20].

Результаты исследования.

Поверхностный эффект и эффект близости оказывают большое влияние на плотности токов внутри электродов и ткани, что влияет на качество сварки.

С помощью моделирования можно получить информацию, которую крайне тяжело или невозможно получить экспериментальными методами, во многих случаях отказаться от экспериментов на животных, ускорить и удешевить исследования.

Компьютерное моделирование позволяет найти оптимальные режимы сварки и конструкцию инструментов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Украины (ДБ №0119U100189).

Disclaimers: The author declares that they have no financial or personal relationships that may have inappropriately influenced them in writing this article.

Conflict of interest statement: The authors state that there are no conflicts of interest regarding the publication of this article.

ORCID 0000-0002-8692-6677 Alexei V. Lebedev

ORCID 0000-0001-6070-3945 Andrii Dubko

ORCID 0000-0002-4276-1145 Oleksandr Bondarenko

REFERENCES:

1. Патон Б.Є., Иванова О. Н. Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия. – Киев: Наукова думка, 2009. 200 с.
2. Лебедев А. В., Дубко А.Г. Применение сварки живых тканей в хирургии (Обзор) // Медицинская техника. 2020 г. № 1. С. 51–55.
3. Патон Б.Е., Лебедев В.К., Лебедев А.В. и др. Способ сварки мягких тканей животных и человека / Патент РФ на изобретение №2294171. Опубл. 27.02.2007. Бюл. №6.
4. Бондар Г.В., Купрієнко М.В., Волос Л.І. та ін. Високочастотне біологічне зварювання тканин в онкогінекології. – Донецьк: «Каштан», 2010. 264 с.
5. Яровая С.О., Лебедев А.В. Математическое моделирование сварки кровеносных сосудов электрохирургическим пинцетом // Биомедицинская инженерия и электроника. 2016. № 1. 7 с.
6. Явдошко А.С., Стасюк Ю.П., Лебедев А. В. Компьютерное моделирование бескровного разрезания живых тканей электрохирургическими зажимами и ножницами в хирургии. Биомедицинская инженерия и электроника. 2019, № 2. 8 с.
7. Paton B.E., Lebedev V.K., Furmanov Y.A., et al. Instrument and method for the end-to-end reconnection of intestinal tissues / Patent App. US 2007/0276363 A1. Publ. Nov.29.2007.
8. Берестюк К. Р., Лебедев О. В. Модель міцності зварного анастомозу тонкого кишечника при радіальному навантаженню у середовищі SolidWorks // Биомедицинская инженерия и электроника. – 2020. – № 2. 14 с.
9. Подпратов С. С., Подпратов С. Є., Гичка С. Г. та ін. Вплив перетворень у стінці тонкої кишки при створенні електрозварних анастомозів різного типу на розривну міцність з'єднання // Хірургія України. - 2018. - № 3. - С. 57–62. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KhU_2018_3_12

10. Драгомирецкий Н.Я., Лебедев А. В. Метод высокочастотной электросварки биологических тканей в офтальмологии // Биомедицинская инженерия и электроника. 2017. № 4. 7 с.
11. Уманец Н.Н., Пасечникова Н.В., Науменко В.А. и др. Эндорезекция меланомы сосудистой оболочки глазного яблока с использованием высокочастотной электросварки биологических тканей // Офтальмологический журнал. 2016. №4. С.11-1
12. Сидорець В.М., Дубко А.Г. Розподіл струму в електродах електрохірургічних інструментів при зварюванні біологічних тканин // Восточно-Европейский журнал передових технологій. – 2015. - №3. - С.24-28.
13. V. Sydorets, A. Lebedev, A. Dubko. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery // 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine. P. 215–217.
14. Патент України на корисну модель No117691. Активний електрод для високочастотної електрохірургії. Винахідники: Дубко А.Г., Чвертко Н.А., Сіленко А.К., Васильченко В.А. Опубл. 10.07.2017. Бюл. No13.
15. V. Sydorets, A. Dubko, O. Bondarenko and R. Kosenko, "Influence of skin effect on current flow through electrodes of electro-surgical instruments and biological tissue," 2016 15th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC), 2016, pp. 211-214, doi: 10.1109/BEC.2016.7743766.
16. A. Dubko, V. Sydorets and O. Bondarenko, "Simulation of the Temperature Distribution with High-Frequency Electrosurgical Heating," 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2018, pp. 394-397, doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477555.
17. Сивець А. Ю., Лебедев О. В. Особливості застосування SolidWorks при моделюванні зварки живих тканин // Биомедицинская инженерия и электроника. – 2020. – № 2. 15 с.
18. Явдошко А.С., Лебедев А. В. Моделирование тепловых процессов электрохирургического инструмента в SolidWorks // Биомедицинская инженерия и электроника. 2018. № 2. 8 с.
19. Дубко А.Г., Чвертко Н.А., Лебедев О.В. Застосування імпедансометрії при біполярному з'єднанні зварюванням біологічних тканин // Биомедицинская инженерия и электроника. 2021 № 2. 14 с.
20. Лебедев А. В., Дубко А. Г. Применение сварки живых тканей для гемостаза при хирургических операциях (обзор). Биомедицинская инженерия и электроника. 2021 № 1. 17 с.

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: 4141184@kntu.net.ua / ID: 9432678
Проверяющий: 4141184@kntu.net.ua / ID: 9432678

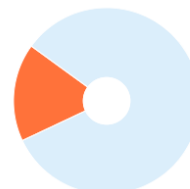
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - users.antiplagiat.ru

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 7
Начало загрузки: 26.11.2021 12:55:05
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: 9.pdf
Название документа: 9
Размер текста: 16 кБ
Символов в тексте: 16418
Слов в тексте: 2107
Число предложений: 275

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 26.11.2021 12:55:06
Длительность проверки: 00:00:02
Комментарии: не указано
Модули поиска: Интернет



ЗАИМСТВОВАНИЯ

16,52%

САМОЦИТИРОВАНИЯ

0%

ЦИТИРОВАНИЯ

0%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ

83,48%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.
Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.
Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.
Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.
Заимствования, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.
Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Актуален на	Модуль поиска
[01]	1,97%	Download this PDF file http://journals.urau.ua	10 Июл 2020	Интернет
[02]	8,76%	Download this PDF file http://journals.urau.ua	10 Июл 2020	Интернет
[03]	2,55%	Download this PDF file http://journals.urau.ua	10 Июл 2020	Интернет