

УДК 57.089.001.66

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.09

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ МИКРОХИРУРГИЧЕСКИМИ ПИНЦЕТАМИ

А. В. ЛЕБЕДЕВ^{1*}, А. Г. ДУБКО^{2,1}, С. О. ЯРОВАЯ¹

¹ Кафедра биомедицинской инженерии, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, УКРАИНА

² Отдел «Сварка и родственные технологии в медицине и экологии», ИЭС им. Е.О. Патона, Киев, УКРАИНА

*email: o.lebediev@kpi.ua

АННОТАЦИЯ Микрохирургия представляет собой отдельный раздел хирургии, занимающийся оперативным лечением малых по размеру структур организма человека, которые зачастую недоступны невооруженному глазу. Все микрохирургические операции выполняются с использованием операционных микроскопов, миниатюрных хирургических инструментов. Пинцеты являются одним из самых важных инструментов при проведении микрохирургических вмешательств. Они удерживают мелкие участки тканей и очень тонкие шовные материалы при завязывании узлов. В Институте электросварки НАН Украины разработаны пинцеты для сварки тканей в микрохирургии. Целью исследования является создание модели сварки пинцетом, определение распределения механических напряжений в ткани в зависимости от силы сжатия электродов и механических свойств ткани, определение оптимальной формы браншей и электродов, рассмотрение влияния не параллельности электродов. Анализ и моделирование электрохирургического пинцета проводились с помощью комплекса SolidWorks. SolidWorks позволяет создавать конструкторскую документацию и проводить математическое моделирование сварки. В статье приведен метод математического моделирования микрохирургических пинцетов, необходимый для их проектирования. Были проанализированы резонансные частоты системы пинцет-ткань. При некоторых частотах электроды начинают скользить по ткани в противоположных направлениях, что уменьшает прочность шва. При определенных условиях возможна потеря устойчивости пинцета. Рассмотренное моделирование может быть полезно при проектировании обычных пинцетов.

Ключевые слова: SolidWorks, биполярный пинцет, сварка, модуль Юнга, перемещение, деформация, резонанс.

MATHEMATICAL MODELING OF THE RESISTANCE WELDING OF LIVING TISSUES BY THE SPECIALIZED MICROSURGICAL TWEEZERS

A. LEBEDEV^{1*}, A. DUBKO^{2,1}, S. YAROVAYA¹,

¹ Department of Biomedical Engineering, National Technical University of Ukraine «KPI», Kyiv, Ukraine

² Department of Welding and Related Technologies in Medicine and Ecology, E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT Microsurgery is a separate surgery section, dealing with surgical treatment of small size structures of the human body, which are often not available to the naked eye. The operating microscope and miniature surgical instruments perform all microsurgical operations. Tweezers is one of the most important tools in conducting microsurgical operations. They hold small portions of tissue and very thin sutures for tying knots. The Paton Welding Institute designed tweezers for welding tissue in microsurgery. The aims of the study are: to create a model of welding tweezers; to determine of the distribution of mechanical stresses in the tissue, depending on the compression force of the electrodes and mechanical properties of the tissue; to determine the optimal shape of the jaws and electrodes; to consider the influence of the angle between the electrodes at the welding. 3D CAD Packages SolidWorks performed analysis and modeling of electro-surgical forceps. SolidWorks allows to create design documentation and to perform mathematical modeling of welding. The paper presents a method of mathematical modeling of microsurgery tweezers, needed for their design. The electrodes should converge at an angle for secure grasping of the tissue. The angle between the electrodes reverses upon further compression, leading to expulsion of tissue. The resonant frequency of the system forceps-tissue analyzed. The electrodes glide over the tissue in opposite directions at certain resonant frequencies, which reduces the strength of the welding. Tweezers can become unstable under certain conditions. Modeling can be useful in the design of conventional tweezers.

Keywords: SolidWorks, bipolar forceps, welding, Young's modulus, displacement, deformation, resonance.

Введение

В Институте электросварки НАН Украины проводится научная работа по разработке большого количества электрохирургических инструментов для сварки живых биологических тканей (БТ) в хирургии [1-7]. В особом ряду находится разработка микрохирургических пинцетов. Такие пинцеты используются в исследованиях по соединению нервов

с помощью тканесохраняющей высокочастотной электросварочной технологии [8-10]. При проектировании этих инструментов математическое моделирование позволяет определить напряжения, деформации и смещения БТ. Представляет интерес надежность фиксации электродом ткани. Следует определить условия резонанса системы: "рука хирурга - пинцет - свариваемая ткань". В микрохирургическом пинцете не используется направляющий,

изолированный штырь между браншами. Поэтому при сжатии электроды могут смещаться. В этом случае сварки не происходит, а будет разрезание БТ.

Цель работы

Создание модели сварки пинцетом, определение распределения механических напряжений в ткани в зависимости от силы сжатия электродов и механических свойств ткани, определение оптимальной формы браншей и электродов, рассмотрение влияния не параллельности электродов.

Изложение основного материала

Анализ и моделирование электрохирургического пинцета проводились с помощью комплекса SolidWorks (рис.1). Бранши пинцета сделаны из нержавеющей стали с модулем Юнга $2e^{11}$ Н/м², коэффициентом Пуассона – 0,28. Длина пинцета – 90 мм. Электроды имеют квадратное поперечное сечение, длина стороны квадрата – 0,5 мм. Биологическая ткань имеет модуль Юнга $1,2e^5$ Па, коэффициент Пуассона – 0,39.

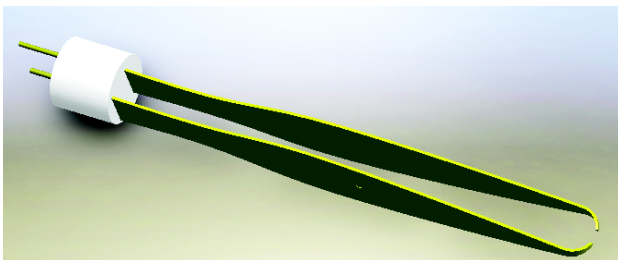


Рис. 1 – 3D модель пинцета для микросварки, выполненная в SolidWorks.

При моделировании определялись:

1. механические напряжения в ткани;
2. условия фиксации пинцетом ткани;
3. резонансные частоты;
4. устойчивость системы при отсутствии

направляющего, изолированного штыря между браншами для предотвращения соскальзывания электродов.

Толщина ткани – 0,1 мм. Бранши сжимают ткань симметрично, поэтому для упрощения расчетов моделирование выполнялось для одной бранши и половины толщины ткани. Моделирование выполнялось для усилий сжатия бранш: 0,5; 1 и 2 Н.

Обсуждение результатов

При силе сжатия 0,5; 1 и 2 Н в результате деформации браншей меняется знак угла наклона электродов (рис. 2, 3, 4). Электрод перестает фиксировать ткань, а наоборот - начинает выталкивать ткань от себя.

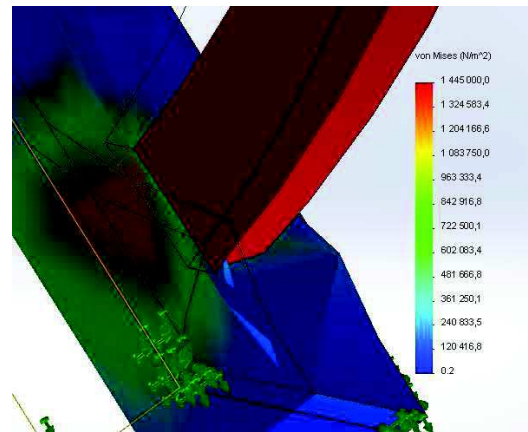


Рис. 2 – Напряжение в электроде и ткани после сжатия силой 2 Н

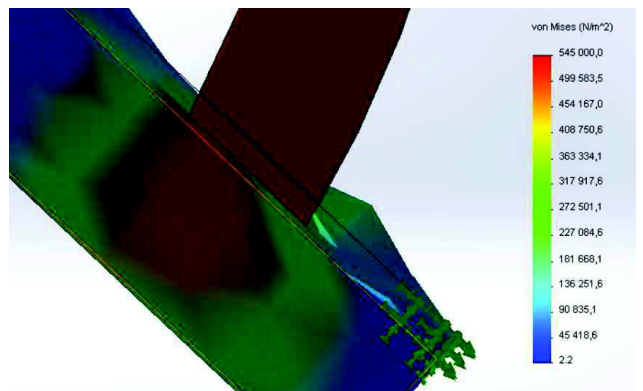


Рис. 3 – Напряжение в электроде и ткани после сжатия силой 1 Н

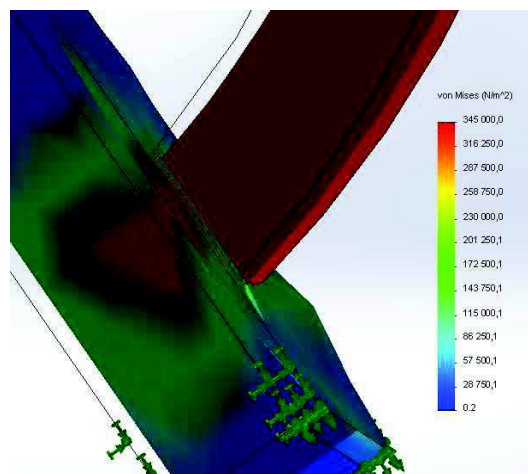


Рис. 4 – Напряжение в электроде и ткани после сжатия силой 0,5 Н

Максимальное напряжение зависит от усилия сжатия примерно пропорционально. Проведенные ранее исследования показали, что для надежной сварки удельное давление электродов на ткань должен находиться в диапазоне 1-2 Н/м². При усиллии

2 Н напряження в сварочной ткани находится в пределах 0,9-1,45 Н/мм², что обеспечивает хорошие условия для сварки. При усилии 0,5 Н напряження в сварочной ткани находится в пределах 0,345-0,170 Н/мм², что недостаточно. SolidWorks позволяет строить изоповерхности, которые объединяют точки с одинаковым значением механических напряжений (рис. 5-7).

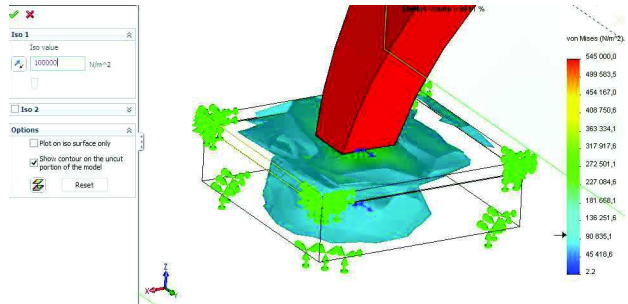


Рис. 5 – Изоповерхности напряжения 0,1 Н/мм²

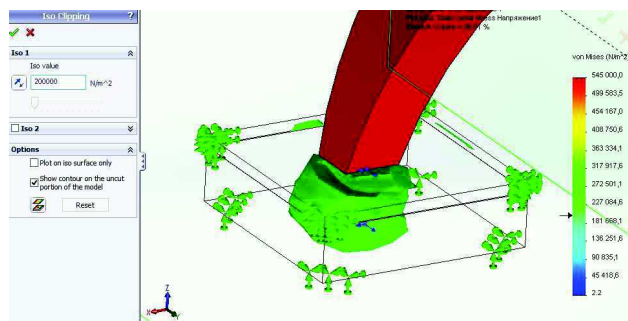


Рис. 6 – Изоповерхности напряжения 0,2 Н/мм²

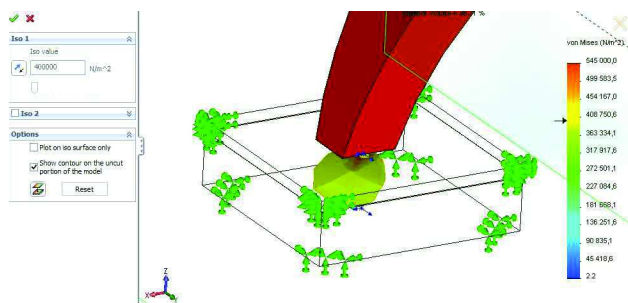


Рис. 7 – Изоповерхности напряжения 0,4 Н/мм²

Расчёты при силе сжатия браншей 1Н приведены на рис. 5-7. Напряжения распределяются неравномерно в свариваемой ткани.

Исследованы деформации ткани вокруг электродов при различных усилиях сжатия пинцета. Деформация измеряется величиной ESTR - отношением размеров БТ при нагрузке к первоначальным. Максимальная деформация 0.296. означает, что размер ткани изменяется почти в 3 раза (рис. 8-10).

На рис. 8-10 коэффициент отображения деформации равен 22. Реальная деформация в 22 раза меньше, чем изображена на рисунках. Большие деформации ткани вокруг электрода приводят к остаточным деформациям и напряжениям, неблагоприятно сказывающимся на прочности шва.

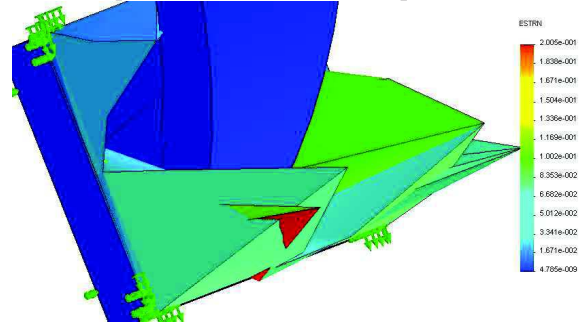


Рис. 8 – Деформация при силе сжатия браншей 0,5Н

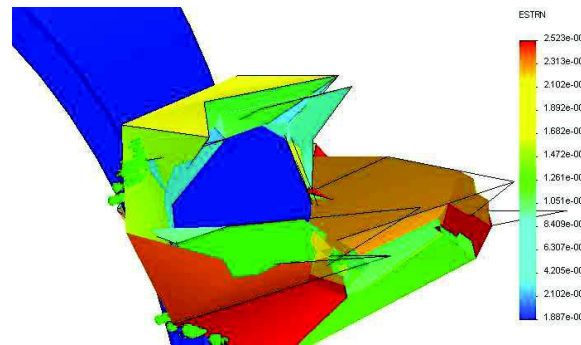


Рис. 9 – Деформация при силе сжатия 1Н

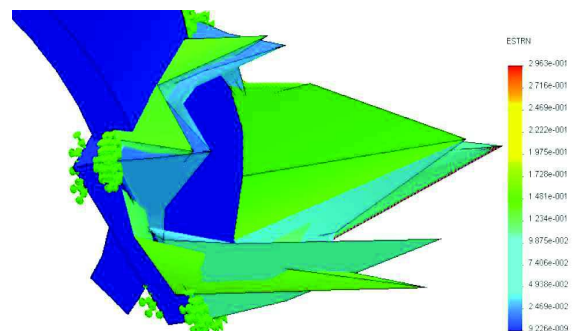


Рис. 10 – Деформация при силе сжатия 2Н

Сварочное напряжение может модулироваться с частотой несколько килогерц. Электромагнитные силы, действующие на бранши, вызывают вибрации электродов. Комплекс SolidWorks позволяет рассчитать все резонансные частоты и соответствующие траектории движения биологической ткани (рис. 11-14).

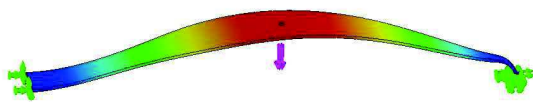
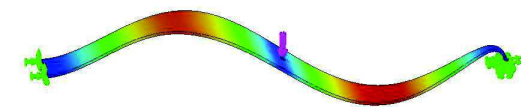
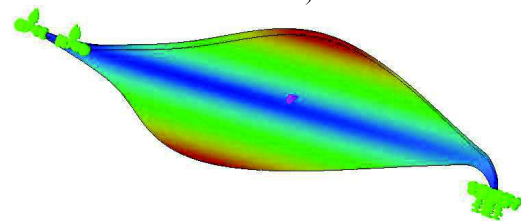


Рис. 11 – Траектория движения в увеличенном масштабе при резонансной частоте 275 Гц

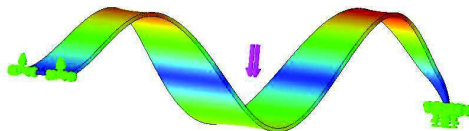


а)

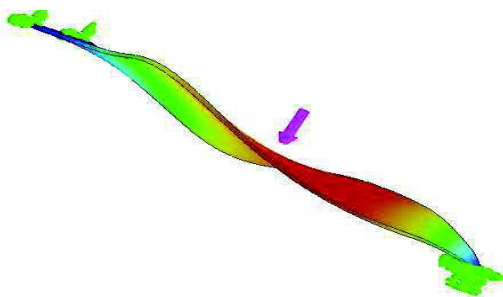


б)

Рис. 12 – Траектории движения в увеличенном масштабе при резонансных частотах:
а) 869 Гц; б) 1441 Гц



а)



б)

Рис. 13 – Траектория движения в увеличенном масштабе при резонансных частотах:
а) 1800 Гц; б) 2505 Гц

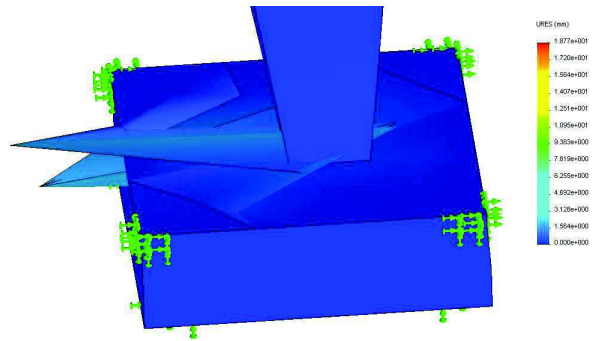


Рис. 14 – Потеря устойчивости пинцета при усилии сжатия 1 Н

Если частота пачек напряжения будет близка к резонансной частоте, то место сварки будет отклоняться с увеличенной амплитудой и двигаться по сложной траектории, что влияет на прочность шва.

В пинцете не используется изолированный штырь между браншами. Поэтому при сжатии, бранши могут перекрестываться. В этом случае сварки не происходит, а будет разрезания ткани.

Из рис. 14 следует, что бранши могут соскользнуть в разные стороны и вместо сварки будет повреждение ткани.

Выводы

1. Создана модель пинцета для микросварки. Модель может быть использована для анализа и проектирования пинцетов других типов.
2. Получены распределения напряжения, деформации, перемещения ткани и браншей.
3. Для надежной фиксации ткани электроды сходятся под углом. При дальнейшем сжатии знак угол между электродами изменяется на противоположный, что приводит к выталкиванию ткани.
4. Проанализированы резонансные частоты системы пинцет-ткань. Показано, что при некоторых резонансных частотах электроды начинают скользить по ткани в противоположных направлениях, что снижает прочность шва.
5. При определенных условиях возможна потеря устойчивости пинцета.

Список литературы

1. Paton, B. E. Electric welding of soft tissues in surgery / B. E. Paton // *The Paton Welding Journal*. – 2004. – № 9. – P. 6-10.
2. Paton, B. E. Welding and related technologies for medical application / B. E. Paton // *The Paton Welding Journal*. – 2008. – № 11. – P. 11-19.
3. Патон, Б. Е. Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия / под ред. Б. Е. Патона, О. Н. Ивановой // *Киев: Наукова думка*. – 2009. – 200 с.
4. Dubko, A. G. Mathematical methods of research of the electric welding of soft biological tissues / A. G. Dubko, A.

- V. Lebedev, E. G. Lopatkina // *11th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012)*. Lviv – Slavske, Ukraine. – 2012. – 226 p.
- 5 Linchevskyy, O. Lung sealing using the tissue-welding technology inspontaneous pneumothorax / O. Linchevskyy, A. Makarov , V. Getman // *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*. – 2010. – № 5. – P. 1126-1128. – doi: 10.1016/j.ejcts.2009.11.017.
 - 6 Umanets, N. N. High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery / N. N. Umanets, N. V. Pasychnikova, V. A. Naumenko, P. B. Henrich // *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. – 2014. – №11. – P. 1697-1703. – doi: 10.1007/s00417-014-2709-0.
 - 7 Sydorets, V. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery / V. Sydorets, A. Lebedev, A. Dubko // *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Lviv, Ukraine.– 2015. – P. 1697-1703. – doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379
 - 8 Корсак, А. В. Особливості регенерації та макроскопічного стану травмованого периферійного нерва за умов застосування ВЧ – електрозварювальної технології та біполярних інструментів під час оперативного лікування в експерименті / А. В. Корсак, Ю. Б. Чайковський, В. В. Ліходієвський, Г. С. Маринський, О. В. Чернець, К. Г. Лопаткіна, В. А. Васильченко, Д. Ф. Сидоренко, Ю. З. Буряк, В. К. Сердюк // *Восьмая международная научно – практическая конференция. Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы*. – Киев, – 2013. – С. 39-40.
 - 9 Корсак, А. В. Морфологічна характеристика мікрооточення нейротитів рухового центру травмованого сідничного нерву за умов впливу високочастотної – електрозварювальної технології / А. В. Корсак, Ю. Б. Чайковський, С. М. Чухрай, Н. В. Ритікова, Г. С. Маринський, О. В. Чернець, К. Г. Лопаткіна, В. А. Васильченко, Д. Ф. Сидоренко, Ю. З. Буряк, В. К. Сердюк // *Вісник Вінницького національного медичного університету*. – 2014. – №2. Т.18. – С. 379- 383.
 - 10 Корсак, А. В. Нейрогліальні взаємовідношення рухового та чутливого центру травмованого сідничного нерва за умов впливу високочастотної електрозварювальної технології / А. В. Корсак, Ю. Б. Чайковський, В. В. Ліходієвський, С. М. Чухрай, Г. С. Маринський, О. В. Чернець, К. Г. Лопаткіна, В. А. Васильченко, Д. Ф. Сидоренко, Ю. З. Буряк, В. К. Сердюк // *Девятая международная научно – практическая конференция. «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы*. – Киев. – 2014. – С. 27.
 - 4 Dubko, A. G., Lebedev, A. V., Lopatkina, E. G. Mathematical methods of research of the electric welding of soft biological tissues. *11th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012)*. Lviv – Slavske, Ukraine, 2012, 226 p.
 - 5 Linchevskyy, O., Makarov, A., Getman, V. Lung sealing using the tissue-welding technology inspontaneous pneumothorax. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 2010. 5. 1126-1128, doi: 10.1016/j.ejcts.2009.11.017.
 - 6 Umanets, N. N., Pasychnikova, N. V., Naumenko, V. A., Henrich, P. B. High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2014, 11, 1697-1703, doi: 10.1007/s00417-014-2709-0.
 - 7 Sydorets, V., Lebedev, A., Dubko, A. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Lviv, Ukraine, 2015, 1697-1703, doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379.
 - 8 Korsak, A. V., Chaykovckyy, Y. B., Likhodievskyy, V. V., Marynskiy, G. S., Chernets, O. V., Lopatkina, K. G., Vasilchenko, V. A., Sidorenko, D. F., Buryak, V. Z., Serdiuk, V. K. Osoblyvosti regeneratsii ta makroskopichnogo stanu travmovanogo peripherynogo nerva za umov zastosuvannya VCH – elektrozvaryuvalnoi tekhnologii ta bipolyarnykh instrumentiv pid chas operatyvnogo likuvannya v eksperymenti [Features regeneration and macroscopic state of the injured peripheral nerve in conditions of the RF - electric welding technology and bipolar instruments during surgery experiment]. *Vosmaya mezhduнародnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Svarka i termicheskaya obrabotka zhyvykh tkanei. Teoriya. Praktika. Perspektivy* [Eighth International scientific - practical konferentsiya. Welding and heat treatment of the living tissue. Theory. Practice. prospects]. Kyev, 2013, 39-40.
 - 9 Korsak, A. V., Chaykovckyy, Y. B., Chukhrai, S. M., Rytynikova, N. V., Marynskiy, G. S., Chernets, O. V., Lopatkina, K. G., Vasilchenko, V. A., Sidorenko, D. F., Buryak, V. Z., Serdiuk, V. K. Morfoloichna kharakteristika mikrootochennya neirotsitiv ruhovogo tsentru travmovanogo sidnichnogo nervu za umov vplyvu vysokochastotnoi-elektrozvaryuvalnoi tekhnologii [Morphological characteristics microenvironment neyrotsytiv motor center injured sciatic nerve under conditions of high-impact - electric welding technology]. *Visnyk Vinnitskogo natsionalnogo medychnogo universitetu* [Bulletin of the Vinnitsa National Medical University], 2014, 2(18), 379-383.
 - 10 Korsak, A. V., Chaykovckyy, Y. B., Likhodievskyy, V. V., Chukhrai, S. M., Marynskiy, G. S., Chernets, O. V., Lopatkina, K. G., Vasilchenko, V. A., Sidorenko, D. F., Buryak, V. Z., Serdiuk, V. K. Neuroglialni vzajemvidnoshennya ruhovogo ta chutlyvogo tsentru travmovanogo sidnychnogo nerva za umov vplyvu vysokochastotnoi elektrozvaryuvalnoi tekhnologii [Neuroglial relationship between the motor and the sensitive injured sciatic nerve center for high-impact conditions of electric welding technology]. *Devyataya mezhduнародnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Svarka i termicheskaya obrabotka zhyvykh tkanei. Teoriya. Praktika. Perspektivy* [Ninth international scientific - practical

Bibliography (transliterated)

- 1 Paton, B. E. Electric welding of soft tissues in surgery. *The Paton Welding Journal*, 2004, 9, 6-10.
- 2 Paton, B. E. Welding and related technologies for medical application. *The Paton Welding Journal*, 2008, 11, 11-19.
- 3 Paton, B. E., Ivanova O. N. Tkanesokhranyayushchaya vysokochastotnaya elektrosvarohnaya khyrurhiya [Tkanesohranyayushchaya high frequency electrowelding Surgery]. *Kyev: Naukova dumka*, 2009, 200 p.

conference. Welding and thermal treatment of living tissues. Theory. Practice. Perspectives]. Kyiv, 2014, 27.

Сведения об авторах (About authors)

Лебедев Алексей Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: o.lebediev@kpi.ua.

Alexei Lebedev – doctor of technical Sciences, Professor of the Department of biomedical engineering of the National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute", Prospekt Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, e-mail: o.lebediev@kpi.ua.

Дубко Андрей Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, отдел «Сварка и родственные технологий в медицине и экологии», ИЭС им. Е.О. Патона; Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», доцент кафедры биомедицинской инженерии, проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: andreyies17@gmail.com.

Andrey Dubko – Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist, Department of Welding and Related Technologies in Medicine and Ecology, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine; Associate Professor, Department of Biomedical Engineering, National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute", Prospekt Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, e-mail: andreyies17@gmail.com.

Яровая Светлана Олеговна. – магистр кафедры биомедицинской инженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», студент, проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: lac360yarova.ru@mail.ru

Svetlana Yarovaya – master of the Department of biomedical engineering of the National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Prospekt Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, e-mail: lac360yarova.ru@mail.ru

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Лебедев А. В. Математическое моделирование контактной сварки живых тканей специализированными микрохирургическими пинцетами / **А. В. Лебедев, А. Г. Дубко, С. О. Яровая** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 60-65. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.09.

Please cite this article as:

Lebedev, A., Dubko, A., Yarovaya, S. Mathematical modeling of the resistance welding of living tissues by the specialized microsurgical tweezers. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 60-65, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.09.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Лебедев, О. В. Математичне моделювання контактної зварювання живих тканин спеціалізованими мікрохірургічними пінцетами / **О. В. Лебедев, А. Г. Дубко, С. О. Яровая** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 60-65. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.09.

АНОТАЦІЯ Мікрохірургія є окремим розділом хірургії, що займається оперативним лікуванням малих за розміром структур організму людини, які найчастіше недоступні неозброєному оку. Всі мікрохірургічні операції виконуються з використанням операційних мікроскопів, мініатюрних хірургічних інструментів. Пінцети є одним з найважливіших інструментів при проведенні мікрохірургічних втручань. Вони утримують дрібні ділянки тканин і дуже тонкі шовні матеріали при зав'язуванні вузлів. В Інституті електрозварювання НАН України розроблено пінцети для зварювання тканин в мікрохірургії. У статті наведено метод математичного моделювання таких пінцетів, необхідний для їх проектування. Моделювання може бути корисним при проектуванні звичайних пінцетів.

Ключові слова: SolidWorks, біполярний пінцет, зварювання, модуль Юнга, переміщення, деформація, резонанс.

Поступила (received) 04.06.2016