

UDC 617-7

ЗАСТОСУВАННЯ ХІРУРГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ЗАСНОВАНИХ НА ФІЗИЧНИХ ПРИНЦИПАХ

Попов Станіслав Володимирович
meastrojoshi@gmail.com

Лебедєв Олексій Володимирович
biowelding@gmail.com

Кафедра біомедичної інженерії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут Імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

Анотація - У даній роботі описуються сучасні методи зварювання та дисекції живих тканин, які використовуються в хірургії. Автори порівнюють переваги та недоліки методів, які засновані на трьох фізичних принципах. Контактне зварювання, яке засноване на використанні високочастотного електричного струму для денатурації білків і утворенні міцного з'єднання. Лазерна хірургія, що використовує лазерну енергію для нагрівання та коагуляції тканин. Ультразвукова хірургія, в якій застосовуються ультразвукові хвилі для з'єднання тканин, а також для руйнування пухлин, спаювання тканин, тощо. Також описуються перспективні напрямки розвитку даних технологій, наприклад, використання ультразвуку в стоматології (ультразвуковий скальпель); високочастотне електрохірургічне зварювання для відновлення цілісності стовбурових клітин, нервів; лазерна хірургія в стоматології; ультразвукова хірургія для фіксації біорозкладаних пластин при переломах нижньої щелепи у дітей; високочастотне зварювання живих тканин (HF LTW) в дитячій хірургії легенів; електрозварювання для накладення колоректального анастомозу; лазерне зварювання аргонним лазером для з'єднання стінок кишечника; лазерне зварювання з нанокompозитним матеріалом для герметизації розривів тонкого кишечника.

Методи. Комплексний систематичний огляд, що узагальнює стан досліджень LTS живих тканин на основі статей, індексованих у Scopus, WoS, DOAJ та Google Scholar.

Ключові слова: хірургія, контактне зварювання, лазерна хірургія, ультразвукова хірургія.

I. ВСТУП

Одним із поширених методів є контактне зварювання, яке використовує високочастотний електричний струм.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (ІЕЗ) цей метод почали вивчати спільно з медичними організаціями з 1992 р. Отримано патенти США та інших країн [1].

Зварювання живих тканин широко використовується для заварювання кровоносних судин і безкровного розрізання тканин. Це істотно зменшує тривалість операції і втрати крові (рис.1). Використання спеціальних затискачів дозволяє розрізати тканину з одночасним заварюванням судин.

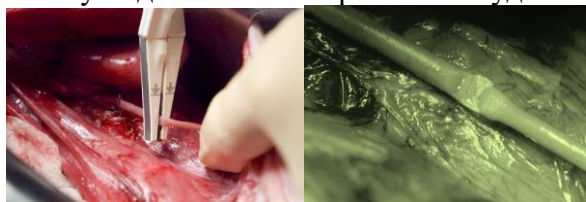


Рисунок 1 - Зварювання артерії (а) та зварена судина (б) [2]

Міцність з'єднання при цьому методі обумовлена термічною денатурацією білків, структурною трансформацією та утворенням колоїдного матеріалу. Е.А. Крамер додає, що під впливом температури 40–60°C колаген розкручується і перетворюється на аморфні завитки пептидних ланцюгів [3].

Процес зварювання полягає в стисканні з'єднуваних тканин електродами зварювального інструменту та подачі електричного струму. Залежно від інтенсивності енергії та температури, колаген у тканині проходить через стадії "зшивання", "розкручування" та "повторного зшивання". Початковою точкою денатурації колагену вважається 40 °C, а термічного пошкодження - 60 °C [3].

Зварювання забезпечує абластичність при онкологічних операціях. Пацієнти надходять на операцію після курсів променевої та хіміотерапії. Це послаблює імунну систему і здатність організму до загоєння ран. Використання ниткових швів

для з'єднання країв ран призводить до гнійних і запальних процесів і відсутності зрощення тканини. Зварювання відразу з'єднує тканини, що сприятливо позначається на післяопераційному періоді.

Одномоментне зварювання кишечника прискорює операцію і забезпечує більшу герметичність, ніж зшивання кишечника циркулярним степлером. Зварювання зручно застосовувати в лапароскопічних операціях замість зшивання кліпсами або скобами, що представлено на рисунку 2.

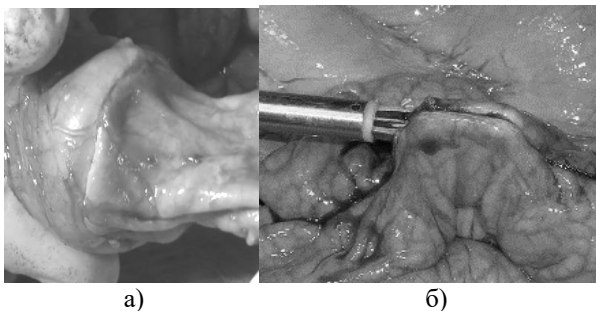


Рисунок 2 - Зварювання кишечника:
а - зварювальний шов «кінець в кінець»;
б - зварювальний шов «бік в бік»

Зварювання має великі перспективи використання при операціях на паренхіматозних органах замість зшивання нитками або скобами.

Для внутрішньоочних операцій використовуються монополярні інструменти (рис. 3).

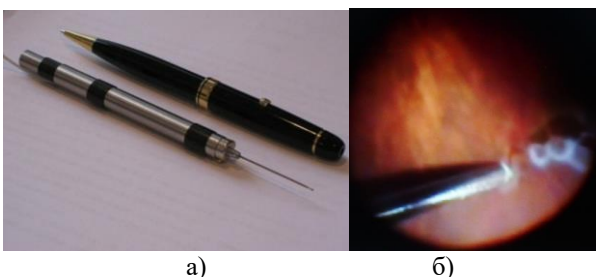


Рисунок 3 - Монополярний інструмент для операцій всередині ока (а), приварювання сітківки до судинної оболонки ока (б).

II. МЕТА РОБОТИ

Мета цієї статті – надати всебічний огляд, узагальнення та порівняння актуальних методів зварювання живих тканин, порівняти випадки їх застосування та результати. Робота спрямована на допомогу дослідникам та практикам для

стимулювання подальших досліджень у цій галузі.

III. КОНТАКТНЕ ЗВАРЮВАННЯ

Ліцензії на виробництво контактних електрокоагуляторів присутні у виробників декількох країн світу. Одним із найбільш розповсюджених зварювальних електрокоагуляторів є Електрокоагулятор височастотний зварювальний ЕКВЗ-300, виробництва ПАТОНМЕД.

Апарат має такі режими роботи: різання, зварювання ручне, зварювання автоматичне і додаткові режими різання/зварювання (у попередніх моделях ЕКВЗ-300 останні два режими відповідно мали назву “зварювання автоматичне 1” та “зварювання автоматичне 2”. В кожному із режимів є 10 підрежимів, що налаштовуються за вимогами хірургів в залежності від характеристик тканин, що обробляються. Переключення з одного режиму, чи підрежиму на інший здійснюється простим натисканням кнопки. Фіксоване налаштування режимів забезпечує повну ідентичність відтворення робочих параметрів від однієї операції до іншої. Кожний режим візуалізується яскравими світловими індикаторами різного кольору, а підрежими відображаються на дисплеї [4].

Основні характеристики зварювального височастотного електрокоагулятора:

- напруга змінного струму мережі живлення – 220 ± 22 В;
- частота змінного струму мережі живлення – $50 \pm 0,5$ Гц;
- потужність споживання від мережі, не більше – 600 ВА;
- вихідна потужність, не більше, в режимах роботи:
 - різання (навантаження 100 Ом) – 300 Вт;
 - зварювання ручне (навантаження 20 Ом) – 200 Вт;
 - зварювання автоматичне (навантаження 20 Ом) – 200 Вт;
 - додаткові режими різання/зварювання (навантаження 20 Ом) – 200 Вт;
- частота вихідного струму електрокоагулятора – 440 ± 44 кГц;

- час безперервної роботи, не більше – 8 годин;
- габаритні розміри, не більше – 440×450×170 мм [4].

Zabolotnyi та Kvasha оцінювали ефективність біполярного високочастотного електричного зварювання при відновленні дефектів після радикального резекції пухлин лобної пазухи. Пацієнти були розділені на дві групи: одну, яка отримувала традиційне зашивання, та іншу, яка проходила зварювання твердої мозкової оболони. Метод зварювання продемонстрував переважні результати з точки зору зниження витоку цереброспінальної рідини, скорочення перебування в стаціонарі та нижчих показників інфекцій порівняно з групою швів. Крім того, процес зварювання був пов'язаний з меншою травмою тканин та швидшим загоєнням. Ці результати свідчать про те, що високочастотне електричне зварювання може представляти перспективну альтернативу традиційному зшиванню для закриття твердої мозкової оболонки в нейрохірургічних процедурах [5].

Bilokon та співавтори вивчали застосування високочастотного зварювання живих тканин (HF LTW) у дитячій хірургії легенів [6]. Їхнє дослідження, яке охопило 103 дитини з первинними та метастатичними пухлинами легенів, продемонструвало ефективність HF LTW для видалення пухлин, коагуляції судин та герметизації легеневої тканини. Ця безкровна та швидка техніка має переваги для різних хірургічних втручань, що включають доброякісні, злоякісні та метастатичні бронхіальні та легеневі ураження у дітей.

Горбовець та співавтори провели масштабне дослідження, яке продемонструвало високу ефективність ендовенозного зварювання як методу лікування хронічної венозної недостатності. Автори проаналізували 5-річні результати застосування цієї методики у значній кількості пацієнтів. Використання автоматичного режиму абляції забезпечило високу відтворюваність результатів та мінімізувало ризик ускладнень. Одним з найважливіших висновків дослідження є

низький рівень післяопераційного болю та висока ефективність процедури у довгостроковій перспективі. Ці результати свідчать про те, що ендовенозне зварювання може розглядатися як перспективний метод лікування варикозної хвороби, який може конкурувати з традиційними методами, такими як лазерна коагуляція та радіочастотна абляція [7].

Також для зварювання тканин застосовується метод контактного зварювання при лікуванні метаплазії. У дослідженні Тисельський та співавтори досліджують високочастотне зварювання (HFW) для лікування езофагеальної метаплазії, передракового стану. Це дослідження порівнює ефективність і безпеку HFW з APC у пацієнтів з езофагеальною метаплазією, які проходять лапароскопічну фундоплікацію Ніссена (операція з посилення нижнього стравохідного сфінктера та запобігання рефлюксу). Результати свідчать про те, що HFW може бути перспективною альтернативою APC. До ключових висновків належать: зменшення стенозів і рецидивів, менше пошкодження тканин, швидше загоєння, відсутність ускладнень пов'язаних з процедурою [8].

У дослідженнях Саволук та Балацький порівнюють вплив лапароскопії з електрозварюванням (63 проведені операції) та стандартної лапароскопії (33 проведені операції) на результати лікування гострого апендициту. Автори виявили, що поєднання лапароскопії та електрозварювання призвело до скорочення тривалості операції (45 хвилин проти 55 хвилин), кращої герметизації кукси червоподібного відростка, що підтверджується відсутністю росту мікроорганізмів у 100% випадків основної групи, зниження ризику інтраабдомінальних ускладнень (0% проти 12,1%), коротшого перебування в стаціонарі (1,5 дня проти 3 днів), більш короткого курсу медикаментозного лікування (1-2 дні проти 3-4 днів). На основі цих результатів автори роблять висновок, що поєднання лапароскопії та електрозварювання є безпечним та ефективним методом лікування гострого апендициту, який може

покращити хірургічні результати та скоротити час перебування в стаціонарі [9].

У дослідженні Подпрятюв та співавторів проаналізовано результати хірургічного лікування раку прямої кишки з використанням різних методів накладення колоректального анастомозу [10]. Автори виявили, що частота неспроможності анастомозу при використанні електрозварювального методу значно нижча, ніж при традиційних методах, таких як ручний шов або зшивання механічними скріпками.

Цей результат свідчить про те, що електрозварювальний метод є більш ефективним та безпечним способом накладення колоректального анастомозу, що може призвести до покращення результатів лікування пацієнтів з раком прямої кишки.

У сфері регенерації нервів Korsak та співавтори порівняли ефективність різних хірургічних методик відновлення цілісності стовбурових клітин нервів після травми периферичних нервів. Їхні висновки свідчать про те, що високочастотне електрохірургічне зварювання може бути найбільш перспективним методом завдяки мінімальному утворенню тканинних уламків, що зрештою сприяє швидкому відновленню нервів [11].

III. УЛЬТРАЗВУКОВА ХІРУРГІЯ

Ультразвукове різання існує в хірургії з 1950-х років. Однак лише наприкінці 20-го століття прогрес у дизайні, трансдукції та контролі ультразвукових інструментів дозволив вийти на ринок комерційно життєздатним ультразвуковим ріжучим пристроям. Ультразвукові хірургічні пристрої, як і в інших потужних ультразвукових застосуваннях, таких як свердління та зварювання, вимагають, щоб пристрої працювали на високій потужності, щоб забезпечити достатній вихідний рух для виконання завдань, для виконання яких вони призначені.

Ультразвукова хірургія використовує ультразвукові хвилі для різних хірургічних маніпуляцій, включаючи зварювання тканин. Mumina стверджує, що ультразвук може впливати як на самі тканини, так і на хірургічні інструменти. Ефекти ультразвукової хірургії включають руйнування пухлин, дроблення каменів у сечових шляхах, зварювання м'яких тканин і кісток (рис. 4) (ультразвуковий остеосинтез). Ультразвук також має знеболюючий, кровоспинний та стерилізуючий ефекти [12].

Вибір методу зварювання живих тканин залежить від конкретної ситуації та потреб хірурга.

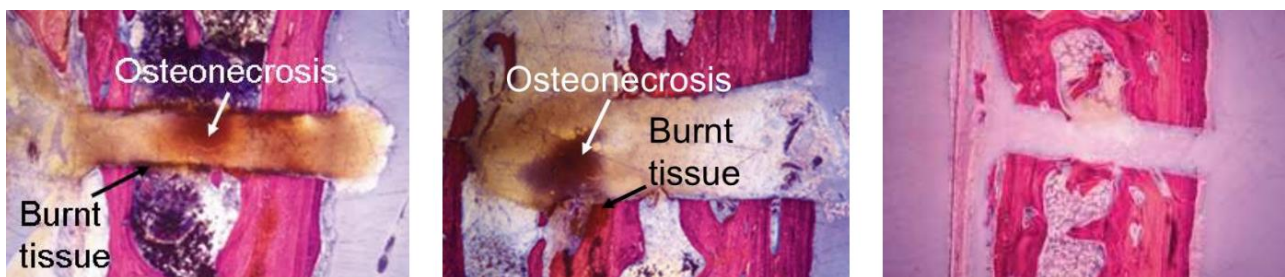


Рисунок 4 - Репрезентативні гістологічні мікрофотографії декальцинованих зразків, що характеризують зовнішній вигляд обрізаних країв базових розрізів при остеотомії ультразвуком (оригінальне збільшення 2,5х, фарбування гематоксилінеозином)

Кожен з описаних методів має свої переваги та недоліки, які слід враховувати при прийнятті рішення.

Відомо, що ультразвукові дисекції значно прискорюють проведення складних лапароскопічних операцій, особливо колоректальних резекцій. Ця технологія ліцензована та використовується в даний час

у стоматології, факоемульгації в офтальмології, розсіченні тканин в абдомінальній хірургії, розрізанні кісток в ортопедії і щелепно-лицевої хірургії, нейрохірургії, вибіркової фрагментації та видаленні патологічної тканини, видаленні кісткового цементу і ліпопластиці. Також була ліцензована технологія для видалення

судинних бляшок при лікуванні хронічної тотальної оклюзії [13].

Одним із методів, зокрема, ультразвукового зварювання є HIFU (високоінтенсивний фокусований ультразвук) – це технологія, яка використовує ультразвукові хвилі високої інтенсивності для руйнування пухлинних тканин (рис. 5). Як стверджують Malietzis та співавтори, завдяки своїм неінвазивним можливостям та здатності мінімізувати побічні ефекти, HIFU має значний потенціал стати цінним інструментом у лікуванні раку. Багатообіцяючі результати клінічних досліджень підтверджують HIFU як дієвий метод лікування раку, особливо для пацієнтів, яким не підходять інші методи [14].

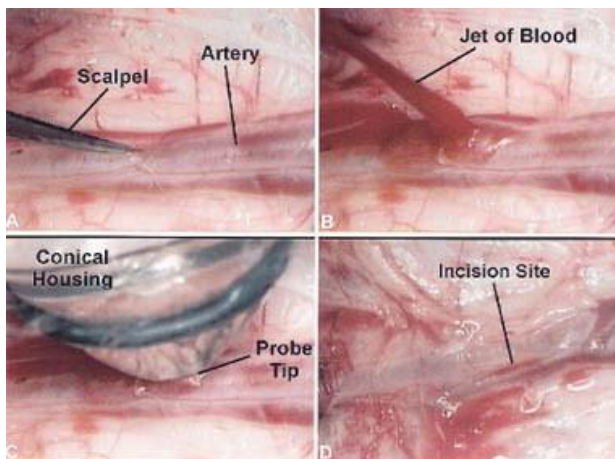


Рисунок 5 - Послідовність фотографій, отриманих під час розрізу та HIFU поверхневої стегнової артерії. А) Лезо скальпеля безпосередньо перед поздовжнім розрізом. Б) Кровотеча струменя з артерії. В) HIFU з конічним корпусом. Зображення конічного корпусу трохи розпливчасте через його вібрацію під час застосування HIFU. Г) Артерія після HIFU сканування та досягнення повного гемостазу. Місце розрізу виглядає як щілина. У місці розрізу спостерігалася згортання крові. Кожна картинка приблизно 3 × 4 см.

Лезо скальпеля безпосередньо перед поздовжнім розрізом. Б) Кровотеча струменя з артерії. В) HIFU з конічним корпусом. Зображення конічного корпусу трохи розпливчасте через його вібрацію під час застосування HIFU. Г) Артерія після HIFU сканування та досягнення повного гемостазу. Місце розрізу виглядає як щілина. У місці розрізу спостерігалася згортання крові. Кожна картинка приблизно 3 × 4 см.

HIFU успішно використовується для лікування раку передміхурової залози, прямої кишки, печінки, нирок, молочної залози та сечового міхура. Він також досліджується для лікування кісткових пухлин.

Декілька досліджень вивчали впровадження інноваційних технологій і в галузі стоматології. Одним із напрямків є

використання ультразвуку в різних стоматологічних процедурах. Muminova повідомляє про ефективність ультразвукового скальпеля при лікуванні пульпіту та глибокого карієсу завдяки його антибактеріальним, протизапальним властивостям та здатності покращувати метаболізм м'яких тканин [12]. Крім того, ультразвук сприяє ретельному очищенню корневих каналів та полімеризації пломбувальних матеріалів.

El-Saadany та співавтори досліджували ефективність ультразвукового зварювання для фіксації біорозкладаних пластин при переломах нижньої щелепи у дітей [15]. Їхні висновки, засновані на 8 пацієнтах, свідчать про успішне загоєння кісток, формування правильного прикусу та стійкість перелому з мінімальними ускладненнями. Ця малоінвазивна техніка має багатообіцяючий потенціал у дитячій щелепно-лицевій хірургії.

Vaezy та співавтори досліджували застосування високоінтенсивного фокусованого ультразвуку (HIFU) для досягнення гемостазу при травмах печінки. На кролячій моделі вони порівняли лікування HIFU (14 проведених операцій) з контрольною процедурою (7 проведених операцій). HIFU успішно контролював кровотечу з розрізів печінки в середньому протягом 78 секунд, без спостереження випадків повторної кровотечі. Важливо, що лікування HIFU не викликало значних змін у кількості клітин крові або параметрах коагуляції. Хоча спостерігалася деяке початкове підвищення ферментів печінки, ці рівні повернулися до норми протягом тижня. Гістологічний аналіз у пізніші терміни показав утворення рубців та регенерацію тканин у місці лікування. Ці результати свідчать про те, що HIFU може бути перспективним новим підходом для досягнення гемостазу печінки з мінімальним порушенням нормальної згортання крові та функції печінки. Подальші дослідження необхідні для оцінки безпеки та ефективності HIFU у більших моделях тварин та потенційно у клінічних застосуваннях [16].

Ruel та співавтори представили підхід до заміни мітрального клапана з використанням внутрішньосерцевого ультразвукового шва. Це доклінічне дослідження продемонструвало доцільність заміни традиційного зав'язування швів швидкою та надійною технікою зварювання. Усуваючи необхідність ручного зав'язування вузлів, цей метод має потенціал для оптимізації процедур заміни клапана та потенційного скорочення часу хірургічного втручання. Було успішно виконано заміну мітрального клапана на моделі вівці, досягнувши надійної фіксації протеза без ознак навколосерцеваного витоку в умовах суворого тестування. Незважаючи на те, що ці висновки є багатообіцяючими, необхідні подальші дослідження для оцінки довговічності зварних швів і оцінки клінічного застосування цієї технології [17].

IV. ЛАЗЕРНА ХІРУРГІЯ

Про з'єднання тканин за допомогою лазерного опромінення вперше було повідомлено наприкінці 1970-х років, коли неодим/ітрій-алюміній-гранатовий (Nd:YAG) лазер використовувався для мікросудинного анастомозу сонної та стегнової артерій шурів.

З того часу лазерна хірургія тканин була оцінена на кількох експериментальних моделях, включаючи кровоносні судини, шкіру (рис. 6), нерви, кишечник, маткові труби тощо [3, 18].



Рисунок 6 - Вигляд шва після розрізання CO₂ лазером [19]

Хірургічні лазери значно відрізняються за довжиною хвилі, вихідною потужністю, методом генерації та передачі хвилі, контролем розміру зони впливу, режимом роботи, системою охолодження, тощо.

Зокрема, система LightScalpel — це платформа з гнучким волокном CO₂ лазера, призначена для хірургічних та стоматологічних застосувань на м'яких тканинах. Вона використовує довжину хвилі 10,6 мкм, яка добре поглинається молекулами води в м'яких тканинах. Це дозволяє робити дуже точні розрізи або абляцію з мінімальним бічним термічним пошкодженням і хорошим гемостазом. Гнучке волокно забезпечує кращу маневреність в хірургічних умовах. Система призначена для використання в різних галузях (стоматології, пластичній хірургії, ЛОР, стоматології та щелепно-лицевій хірургії) для розрізу, абляції або коагуляції м'яких тканин.

Специфікації хірургічного лазера моделі LS-2010 наступні [20]:

- живлення: 100–120 В, 10 А, 50/60 Гц;
- потужність у безперервному режимі (CW) на тканині: 20 Вт;
- середня потужність у режимі SuperPulse (SP) на тканині: 10 Вт;
- довжина хвилі лазера: 10,6 мкм;
- пікова щільність потужності в режимі SP на цілі: 100 000 Вт/см²;
- тривалість одиничного імпульсу: 5–500 мс;
- енергія одиничного імпульсу: 10–10 000 мДж;
- максимальна середня щільність потужності: 40 000 Вт/см²;
- тип лазерної трубки та система охолодження: металевий корпус, повітряне охолодження;
- висота: 103 см;
- габарити основи: 38 × 38 см;
- вага: 21 кг.

Так звані «мінімально інвазивні» лазерні методи забезпечують значні покращення: у них лазерна хірургія виконується всередині тіла людини через невеликі розрізи за допомогою оптоволоконних зондів та ендоскопів, або лазерні інструменти виступають як заміна звичайних інструментів для мінімізації хірургічної травми, наприклад, зшиваючи біологічні тканини за допомогою лазера. Метою цих процедур є покращення якості життя

пацієнтів, скорочення часу загосння та ризику післяопераційних ускладнень.

Було показано, що лазерне зварювання тканин має ряд переваг порівняно зі звичайними методами закриття, наприклад, скорочений час операції, менші вимоги до навичок лікарів, зниження запальної реакції на чужорідне тіло, швидше загосння, підвищена здатність до регенерації. Лазерне зварювання також має потенціал сприяти формуванню повного зшивання, що робить можливим негайний водонепроникний анастомоз, що особливо важливо у випадку відновлення судин, сечостатевого шляхів і шлунково-кишкового тракту. Водонепроникне закриття також перешкоджає виходу регенеруючих аксонів і входу фібробластів. Нарешті, лазерне зварювання можна використовувати ендоскопічно та лапароскопічно, щоб розширити діапазон його застосування у випадках, коли не можна використовувати шви або скоби [21].

Як показали Mistry та співавтори, лазерне зварювання тканин (ЛЗТ) має певні недоліки, які обмежують його широке використання в клінічній практиці. По-перше, міцність зварного шва, отриманого за допомогою ЛЗТ, часто буває недостатньою, що потребує додаткового накладання швів. По-друге, значний термічний вплив може призвести до пошкодження тканин (рис. 7) [19].

рідких і напівтвердих припоїв та систем контролю температури.

Найбільш часто використовуваними медичними лазерами є CO₂, аргон і Nd:YAG. Лазери CO₂ і аргону є тими, хто найбільше підходить для застосування в медичних операціях завдяки своїм лазерним властивостям і біологічній сумісності. Застосування цих лазерів характеризується їх здатністю до коагуляції, випаровування та руйнування.

Perveen та співавтори визнають перевагу лазерної технології над традиційними альтернативами, такими як використання припою, завдяки її точності, мінімальній інвазивності та швидшим часом операції [22]. Лазерне зварювання пропонує численні переваги, включаючи високоякісні зварні шви, зменшені зони термічного впливу та підвищений комфорт пацієнта завдяки мінімальним або повністю відсутнім вимогам до анестезії. Обидва дослідження очікують на постійне вдосконалення технології лазерного зварювання, що потенційно призведе до її широкого застосування в стоматологічній сфері.

Застосування припою при лазерному зварюванні рогівки. Strassmann та співавтори розробили систему CO₂ лазера з контрольованою температурою для точного нагрівання та склеювання рогівкової тканини. Ключовим нововведенням було використання інфрачервоної радіометрії для

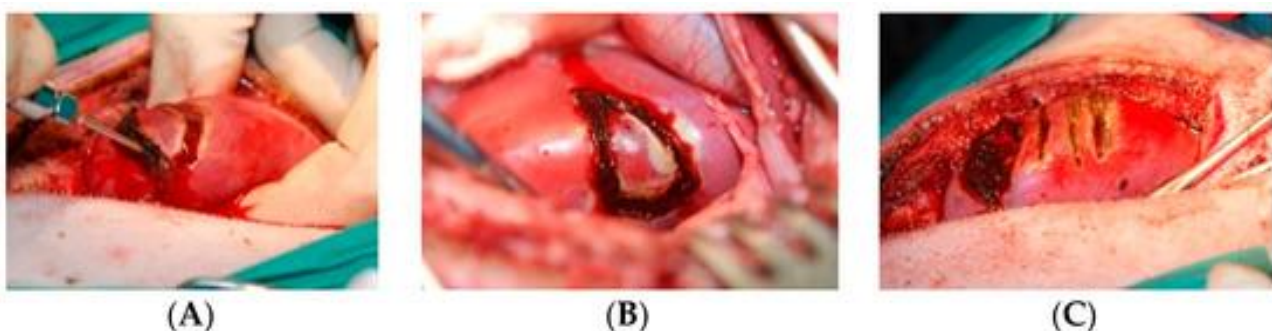


Рисунок 7 - Інтраопераційна оцінка кровотечі та термічного пошкодження під час клиноподібної нефрeктомії та розрізу нирки за допомогою волоконного лазера, легований тунієм (TDFL) та діодним лазером (DL): (A) клиноподібна нефрeктомія з DL; (B) клиноподібна нефрeктомія з TDFL; (C) два поперечних розрізи, розріз TDFL зліва і DL справа; ліва рана зображена після клиновидної нефрeктомії з TDFL.

Для подолання цих недоліків розроблено нові методи ЛЗТ, такі як використання

моніторингу та регулювання температури тканини під час процесу паяння. Крім того,

було використано біосумісний альбуміновий припій для посилення адгезії тканини. Ефективність методу оцінювалась *in vitro* шляхом порівняння тиску витоку лазерно-спаяних роговиць з тими, які були зашиті традиційним способом. Наступні *in vivo* експерименти на кроликах продемонстрували успішне паяння рогівки з мінімальним термічним пошкодженням та запаленням. Ці результати свідчать про те, що лазерне паяння може запропонувати перспективну альтернативу традиційним методам зшивання в хірургії рогівки [23].

Bleier та співавтори дослідили застосування ендоскопічного лазерного зварювання тканин (LTW) для закриття слизових пошкоджень у синусо-носовій порожнині. Результати свідчать про перспективність LTW. Десять пацієнтів пройшли ендоскопічне LTW з використанням припою з альбумін-гіалуронової кислоти, демонструючи технічну можливість застосування з мінімальним часом лазерного опромінення та необхідним об'ємом припою. Ускладнення не спостерігались більше трьох місяців [24].

Лазерне зварювання тканин також стало багатообіцяючою альтернативою традиційній шовній нейрорафії для відновлення лицьового нерва. Bloom та співавтори досліджували можливість застосування цієї методики на моделі кролика. Хоча попередні їхні висновки свідчать про те, що саме лазерне зварювання може мати переваги у тривалості операції та потенційних функціональних результатів, про що свідчить покращення електрофізіологічних параметрів через 16 тижнів. Проте необхідні подальші широкомасштабні дослідження для з'ясування довгострокової ефективності та гістологічних наслідків цієї технології, особливо в порівнянні з відновленням швів [25].

Радиш та співавтори представили результати широкого клінічного досвіду застосування ендовенозного радіочастотного зварювання для лікування варикозного розширення вен. Автори продемонстрували високу ефективність та

безпеку цього методу у великій когорті пацієнтів. За даними дослідження, більшість пацієнтів відзначили значне зменшення симптомів венозної недостатності, а відсоток ускладнень був низьким. Автоматизований процес зварювання забезпечив високу відтворюваність результатів та мінімізував ризик людського фактору. Ці результати підтверджують, що ендовенозне радіочастотне зварювання є ефективною та безпечною альтернативою традиційним методам лікування варикозної хвороби [24].

Відновлення цілісності кишечника після хірургічного втручання є важливим етапом лікування захворювань травної системи. Традиційні методи, такі як ушивання, мають певні недоліки, як-от тривалість процедури та ризик інфекцій. У дослідженні Çilesiz та співавторами запропоновано інноваційний метод з'єднання стінок кишечника – лазерне зварювання аргонним лазером [27]. За допомогою системи контролю температури вдалося досягти міцного з'єднання тканин при температурі 90-95 градусів Цельсія. Зварювання відбувалося за рахунок термічної коагуляції колагенової підслизової оболонки та слизової оболонки.

Стандартні методи хірургічного зшивання кишечника можуть призвести до протікання в місці з'єднання, що є серйозним ускладненням, яке може призвести до інфекції. В наступному дослідженні Cilesiz та співавторів було запропоновано використовувати лазерне зварювання з нанокompозитним матеріалом для герметизації розривів тонкого кишечника свині [27]. Цей матеріал дозволяє регулювати механічні властивості з'єднання залежно від концентрації золотих наностержнів.

У дослідженні Rabau та співавтори проаналізували вміст колагену та ДНК у місці з'єднання кишечника миші після лазерного зварювання та накладення швів [28]. На 4 день після операції рівень колагену та ДНК був значно нижчим у місці лазерного зварювання, ніж у місці накладення швів. На 7 та 10 день після операції рівень колагену в місці лазерного зварювання значно підвищився та перевищив рівень у місці накладення швів.

Лазерні технології використовуються також в гінекології. В дослідженні Adelman та співавтори розглядають використання різних типів лазерів у гінекологічній хірургії. Автори обговорюють властивості та застосування чотирьох основних типів лазерів: CO₂, Nd:YAG, KTP:YAG та аргонний. CO₂ лазер є одним з найпоширеніших в гінекології. Його випромінювання добре поглинається водою, що робить його ідеальним для поверхневих процедур, таких як лікування ендометріозу, видалення міоми та лікування аномальної маткової кровотечі. Nd:YAG лазер має більшу глибину проникнення, ніж CO₂ лазер, що робить його придатним для більш глибоких процедур, таких як резекція міоми матки та септопластика. Nd:YAG лазер також добре коагулює тканини, що робить його цінним інструментом для зупинки кровотечі. KTP:YAG лазер використовується для лікування пігментованих уражень, таких як ендометріоз. Він добре поглинається гемоглобіном і меланіном, що робить його ефективним для вапоризації цих тканин. Аргонний лазер також використовується для лікування ендометріозу завдяки своїм коагуляційним властивостям та здатності вапоризувати пігментовані тканини [29].

VII. ВИСНОВКИ

Зварювання живих тканин – це розвиваюча галузь, яка пропонує перспективні методи хірургічного втручання. Сучасні методи, такі як контактне зварювання, лазерне зварювання тканин (ЛЗТ) та ультразвукова хірургія, вже демонструють свою ефективність у різних хірургічних процедурах.

Метод контактного зварювання живих тканин демонструє значний потенціал і активно застосовується у сучасній хірургії завдяки своїм перевагам перед традиційними методами зшивання. Основними сферами застосування даного методу є: судинна, онкологічна, вісцеральна, ЛОР, торакальна хірургії, офтальмології, гастроентерології, урології та колопроктології.

Ультразвукове зварювання є перспективною технологією, яка знаходить все більш широке застосування в різних галузях хірургії. Його основні переваги

полягають у високій точності, мінімальній інвазивності, можливості зварювання різних тканин, а також у зменшенні післяопераційних ускладнень. Основними сферами застосування ультразвукового зварювання є: загальна, кардіо, щелепно-лицьова хірургії, онкології, нейрохірургії та стоматології.

Лазерне зварювання тканин – це перспективна технологія, яка все частіше застосовується в різних галузях медицини. Вона пропонує ряд переваг порівняно з традиційними методами з'єднання тканин, таких як: мінімальна інвазивність, швидке загоєння, висока точність, зниження ризику ускладнень, можливість використання припоїв. Сферами застосування лазерного зварювання є: кардіо-, нейрохірургії, офтальмології, гастроентерології, урології, гінекології та стоматології.

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, тому вибір методу залежить від конкретної ситуації та потреб хірурга. Важливо враховувати такі фактори, як точність, швидкість, мінімально інвазивний характер та ризик пошкодження тканин.

Важливими напрямками для подальших досліджень можуть бути: розробка нових методів зварювання живих тканин з покращеними характеристиками; вивчення довгострокових результатів зварювання живих тканин; дослідження впливу зварювання живих тканин на імунну систему; розробка нових біоматеріалів для зварювання живих тканин, тощо.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію. Усі автори, що мають відношення до рукопису дали згоду на публікацію даної роботи.

ORCID ID та внесок авторів:

0000-0003-1518-6824 (B,C,E) **Popov**

Stanislav

0000-0002-8692-6677 (A,D,F) **Lebedev**

Alexei

A - Ідея дослідження проведених операцій з високочастотного електрозварювання паренхіматозних органів, B - Формулювання цілей і завдань дослідження, C - Створення

моделей електродів та проведення дослідницького процесу, D - Координація дослідницької діяльності, E - Формування статті, F - Рецензування роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Патон БС, Іванова ОН. Тканинозберігаюча високочастотна електрозварювальна хірургія. Київ: Наукова думка; 2009. 200 с.
2. Lebedev AV, Dubko AG. Use of electric welding of living tissues in surgery (review). Biomed Eng. 2020;54:73–8. doi:10.1007/s10527-020-09977-3.
3. Wang H, et al. Temperature distribution of vessel tissue by high frequency electric welding with combination optical measure and simulation. Biosensors. 2022;12(4):209. Available from: <https://doi.org/10.3390/bios12040209> [Accessed 2024 Apr 30].
4. Електрокоагулятор високочастотний зварювальний ЕКВ3-300: Свідоцтво про держ. реєстрацію № 14574/2015 / ІЕЗ ім Є. О. Патона НАН України.
5. Zabolotnyi D, Kvasha O. Biophysical evaluation of the effectiveness of high-frequency bipolar electric welding for closing defects in the dura mater in frontal sinus tumours with intracranial spread. Bull Med Biol Res. 2023;5(3):16–24. doi:10.61751/bmbr.2706-6290.2023.3.16 [Accessed 2024 Apr 30].
6. Bilokon OV, et al. New approaches to the surgical treatment of lung and bronchial tumors in children. Int J Biol Biomed Eng. 2021;15:311–7. Available from: <https://doi.org/10.46300/91011.2021.15.37> [Accessed 2024 Apr 30].
7. Горбовець ВС, Мельничук ГО, Горбовець СВ. Ендовенозне зварювання: 5-річний досвід застосування автоматичного режиму абляції у флебологічній практиці. Укр журн клін хірургії. 2023;90(3):10. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KIKh_2023_90_3_13
8. Tyselskyi V, Poylin V, Kebkalo A. Biological welding – novel technique in the treatment of esophageal metaplasia. Pol Przegl Chir. 2020 Apr 19;92(5):1–5. doi:10.5604/01.3001.0014.1176. PMID: 32945268.
9. Саволук СІ, Балацький РО. Поєднання лапароскопічних та електрозварювальних технологій у лікуванні хворих з гострим апендицитом як фактор профілактики інтраабдомінальних ускладнень. Шпитальна хірургія. Журнал імені ЛЯ Ковальчука. 2016;(3):89–93. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/shpkh_2016_3_20
10. Podpriatov SS, et al. The features of electric welding colorectal anastomosis creation in experiment and clinics. Rep Vinnytsia Natl Med Univ. 2018;22(3):532–7. Available from: [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2018-22\(3\)-29](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2018-22(3)-29) [Accessed 2024 Apr 30].
11. Korsak AV. Ultrastructure of injured peripheral nerve epineurium after surgery using high-frequency electric welding technologies at early regeneration stage. Galician Med J. 2015;22(3):157–60. Available from: <https://ifnmjournal.com/index.php/gmj/article/view/399> [Accessed 2024 Apr 30].
12. Muminova ZA. Ultrasound and its application. J Theory Math Phys. 2023;2(2):11–4 Available from: <http://jtmp.innovascience.uz/index.php/journal/article/download/3/2/2>.
13. O'Daly B, Morris E, Gavin G, O'Byrne J, McGuinness G. High-power low-frequency ultrasound: a review of tissue dissection and ablation in medicine and surgery. J Mater Process Technol. 2008 May 8;200(1–3):38–58. doi:10.21427/8k5k-pg74.
14. Malietzis G, et al. High-intensity focused ultrasound: advances in technology and experimental trials support enhanced utility of focused ultrasound surgery in oncology. Br J Radiol. 2013;86(1024):20130044. Available from: <https://doi.org/10.1259/bjr.20130044> [Accessed 2024 Apr 30].
15. El-Saadany WH, et al. Evaluation of using ultrasound welding process of biodegradable plates for fixation of pediatric mandibular fractures. Tanta Dent J. 2015;12:S22–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tdj.2015.08.003> [Accessed 2024 Apr 30].
16. Journal of Ultrasound in Medicine. 2004;23(2):217. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.7863/jum.2004.23.2.217>
17. Marc Ruel, Richard B. Streeter, Ralph de la Torre, John R. Liddicoat, William E. Cohn, Intracardiac ultrasonic suture welding for knotless mitral valve replacement, European Journal of Cardio-Thoracic Surgery, Volume 21, Issue 2, February 2002, Pages 245–248, [https://doi.org/10.1016/S1010-7940\(01\)01090-9](https://doi.org/10.1016/S1010-7940(01)01090-9)
18. Mistry Y, Natarajan S, Ahuja S. Evaluation of laser tissue welding and laser-tissue soldering for mucosal and vascular repair. Ann Maxillofac Surg. 2018;8(1):35. Available from: https://doi.org/10.4103/ams.ams_147_17 [Accessed 2024 Apr 30].
19. Sessa P. CO2 laser surgical approach to the ventral abdominal incision. Vet Pract News. 2014 Jan. Available from: <https://www.vetscalpel.com/case-studies/co2-laser-surgical-approach-to-the-ventral-abdominal-incision/>
20. Lightscalpel. CO2 Surgical Laser System. LightScalpel. URL: <https://www.lightscalpel.com/products/co2-lasers/lc-2010-surgical-laser> (date of access: 25.09.2025).
21. Pini R, Rossi F, Matteini P, Ratto F. Laser tissue welding in minimally invasive surgery and microsurgery. In: Pavesi L, Fauchet PM, editors. Biophotonics. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer; 2008. doi:10.1007/978-3-540-76782-4_15
22. Perveen A, Molardi C, Fornaini C. Applications of laser welding in dentistry: a state-of-the-art review. Micromachines. 2018;9(5):209. Available from: <https://doi.org/10.3390/mi9050209> [Accessed 2024 Apr 30].
23. Strassmann E, Loya N, Gatton DD, Ravid A, Kariv N, Weinberger D, et al. Laser soldering of the cornea in a rabbit model using a controlled-temperature CO2 laser system. Proc SPIE. 2001;4244. doi:10.1117/12.427799
24. Bleier BS, Cohen NA, Chiu AG, O'Malley BW Jr, Doghramji L, Palmer JN. Endonasal laser tissue welding: first human experience. Am J Rhinol Allergy. 2010 May–Jun;24(3):244–6. doi:10.2500/ajra.2010.24.3463. PMID: 20537294
25. Bloom JD, Bleier BS, Goldstein SA, Carniol PJ, Palmer JN, Cohen NA. Laser facial nerve welding in a rabbit model. Arch Facial Plast Surg. 2012 Jan–Feb;14(1):52–8. doi:10.1001/archfacial.2011.61. PMID: 21844481.
26. Радиш РВ, Палій ВМ, Бурбела ІБ. Досвід ендовенозного радіочастотного зварювання у лікуванні варикозного розширення підшкірних вен. Укр журн клін хірургії. 2023;90(3):42–3. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KIKh_2023_90_3_60.
27. Çilesiz I, et al. Controlled temperature tissue fusion: argon laser welding of canine intestine in vitro. Lasers Surg Med. 1996;18(4):325–34. Available from: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9101\(1996\)18:4<3C325::aid-lsm1%3E3.0.co;2-u](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9101(1996)18:4<3C325::aid-lsm1%3E3.0.co;2-u) [Accessed 2024 Apr 30].
28. Rabau MY, Wasserman I, Shoshan S. Healing process of laser-welded intestinal anastomosis. Lasers Surg Med. 1994;14(1):13–7. Available from:

<https://doi.org/10.1002/lsm.1900140106> [Accessed 2024 Apr 30].

29. Adelman MR, Tsai LJ, Tangchitnob EP, Kahn BS. Laser technology and applications in gynaecology. *J Obstet Gynaecol.* 2013 Apr;33(3):225–31. doi:10.3109/01443615.2012.747495. PMID: 23550847

REFERENCES

1. Paton BE, Ivanova ON. Tkaninozberihaiucha vysokochastotna elektro-zvairuvalna khirurgiia. Kyiv: Naukova Dumka; 2009. 200p.
2. Lebedev AV, Dubko AG. Use of electric welding of living tissues in surgery (review). *Biomed Eng.* 2020;54:73–8. doi:10.1007/s10527-020-09977-3.
3. Wang H, et al. Temperature distribution of vessel tissue by high frequency electric welding with combination optical measure and simulation. *Biosensors.* 2022;12(4):209. Available from: <https://doi.org/10.3390/bios12040209> [Accessed 2024 Apr 30].
4. High-frequency welding electrocoagulator EKVZ-300: Certificate of state registration No. 14574/2015 / EIE named after E. O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine.
5. Zabolotnyi D, Kvasha O. Biophysical evaluation of the effectiveness of high-frequency bipolar electric welding for closing defects in the dura mater in frontal sinus tumours with intracranial spread. *Bull Med Biol Res.* 2023;5(3):16–24. doi:10.61751/bmbr.2706-6290.2023.3.16 [Accessed 2024 Apr 30].
6. Bilokon OV, et al. New approaches to the surgical treatment of lung and bronchial tumors in children. *Int J Biol Biomed Eng.* 2021;15:311–7. Available from: <https://doi.org/10.46300/91011.2021.15.37> [Accessed 2024 Apr 30].
7. Horbovets VS, Melnychuk HO, Horbovets SV. Endovenozne zvairuvannia: 5-richnyi dosvid zastosuvannia avtomatichnoho rezhyumu abliatsii u flebolohichnii praktytsti. *Ukr Zhurn Klin Khirurgii.* 2023;90(3):10. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KIKh_2023_90_3_13
8. Tyselskyi V, Poylin V, Kebkalo A. Biological welding – novel technique in the treatment of esophageal metaplasia. *Pol Przegl Chir.* 2020 Apr 19;92(5):1–5. doi:10.5604/01.3001.0014.1176. PMID: 32945268.
9. Savoliuk SI, Balatskyi RO. Poiednannia laparoskopichnykh ta elektrozvairuvalnykh tekhnolohii u likuvanni khvorykh z hostrym apendytsytom yak faktor profilaktyky intraabdominalnykh uskladnen. *Shpytalna Khirurgiia. Zhurnal imeni L Ya Kovalchuka.* 2016;(3):89–93. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/shpkhir_2016_3_20
10. Podpriatov SS, et al. The features of electric welding colorectal anastomosis creation in experiment and clinics. *Rep Vinnytsia Natl Med Univ.* 2018;22(3):532–7. Available from: [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2018-22\(3\)-29](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2018-22(3)-29) [Accessed 2024 Apr 30].
11. Korsak AV. Ultrastructure of injured peripheral nerve epineurium after surgery using high-frequency electric welding technologies at early regeneration stage. *Galician Med J.* 2015;22(3):157–60. Available from: <https://ifnmjournal.com/index.php/gmj/article/view/399> [Accessed 2024 Apr 30].
12. Muminova ZA. Ultrasound and its application. *J Theory Math Phys.* 2023;2(2):11–4 Available from: <http://jtmp.innovascience.uz/index.php/journal/article/download/3/2/2>.
13. O'Daly B, Morris E, Gavin G, O'Byrne J, McGuinness G. High-power low-frequency ultrasound: a review of tissue dissection and ablation in medicine and surgery. *J Mater*

Process Technol. 2008 May 8;200(1–3):38–58. doi:10.21427/8k5k-pg74.

14. Malietzis G, et al. High-intensity focused ultrasound: advances in technology and experimental trials support enhanced utility of focused ultrasound surgery in oncology. *Br J Radiol.* 2013;86(1024):20130044. Available from: <https://doi.org/10.1259/bjr.20130044> [Accessed 2024 Apr 30].
15. El-Saadany WH, et al. Evaluation of using ultrasound welding process of biodegradable plates for fixation of pediatric mandibular fractures. *Tanta Dent J.* 2015;12:S22–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tdj.2015.08.003> [Accessed 2024 Apr 30].
16. *Journal of Ultrasound in Medicine.* 2004;23(2):217. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.7863/jum.2004.23.2.217>
17. Marc Ruel, Richard B. Streeter, Ralph de la Torre, John R. Liddicoat, William E. Cohn, Intracardiac ultrasonic suture welding for knotless mitral valve replacement, *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, Volume 21, Issue 2, February 2002, Pages 245–248, [https://doi.org/10.1016/S1010-7940\(01\)01090-9](https://doi.org/10.1016/S1010-7940(01)01090-9)
18. Mistry Y, Natarajan S, Ahuja S. Evaluation of laser tissue welding and laser-tissue soldering for mucosal and vascular repair. *Ann Maxillofac Surg.* 2018;8(1):35. Available from: https://doi.org/10.4103/ams.ams_147_17 [Accessed 2024 Apr 30].
19. Sessa P. CO2 laser surgical approach to the ventral abdominal incision. *Vet Pract News.* 2014 Jan. Available from: <https://www.vetscalpel.com/case-studies/co2-laser-surgical-approach-to-the-ventral-abdominal-incision/>
20. Lightscalpel. CO2 Surgical Laser System. LightScalpel. URL: <https://www.lightscalpel.com/products/co2-lasers/ls-2010-surgical-laser> (date of access: 25.09.2025).
21. Pini R, Rossi F, Matteini P, Ratto F. Laser tissue welding in minimally invasive surgery and microsurgery. In: Pavesi L, Fauchet PM, editors. *Biophotonics. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2008. doi:10.1007/978-3-540-76782-4_15
22. Perveen A, Molardi C, Fornaini C. Applications of laser welding in dentistry: a state-of-the-art review. *Micromachines.* 2018;9(5):209. Available from: <https://doi.org/10.3390/mi9050209> [Accessed 2024 Apr 30].
23. Strassmann E, Loya N, Gatton DD, Ravid A, Kariv N, Weinberger D, et al. Laser soldering of the cornea in a rabbit model using a controlled-temperature CO2 laser system. *Proc SPIE.* 2001;4244. doi:10.1117/12.427799
24. Bleier BS, Cohen NA, Chiu AG, O'Malley BW Jr, Doghramji L, Palmer JN. Endonasal laser tissue welding: first human experience. *Am J Rhinol Allergy.* 2010 May–Jun;24(3):244–6. doi:10.2500/ajra.2010.24.3463. PMID: 20537294
25. Bloom JD, Bleier BS, Goldstein SA, Carniol PJ, Palmer JN, Cohen NA. Laser facial nerve welding in a rabbit model. *Arch Facial Plast Surg.* 2012 Jan–Feb;14(1):52–8. doi:10.1001/archfacial.2011.61. PMID: 21844481.
26. Radysh RV, Palii VM, Burbela IB. Dosvid endovenoznoho radiochastotnoho zvairuvannia u likuvanni varykoznogo rozshyrennia pidshkirnykh ven. *Ukr Zhurn Klin Khirurgii.* 2023;90(3):42–3. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/KIKh_2023_90_3_60.
27. Çilesiz I, et al. Controlled temperature tissue fusion: argon laser welding of canine intestine in vitro. *Lasers Surg Med.* 1996;18(4):325–34. Available from: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9101\(1996\)18:4<3C325::aid-lsm1%3E3.0.co;2-u](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9101(1996)18:4<3C325::aid-lsm1%3E3.0.co;2-u) [Accessed 2024 Apr 30].

28. Rabau MY, Wasserman I, Shoshan S. Healing process of laser-welded intestinal anastomosis. *Lasers Surg Med.* 1994;14(1):13–7. Available from: <https://doi.org/10.1002/lsm.1900140106> [Accessed 2024 Apr

29. Adelman MR, Tsai LJ, Tangchitnob EP, Kahn BS. Laser technology and applications in gynaecology. *J Obstet Gynaecol.* 2013 Apr;33(3):225–31. doi:10.3109/01443615.2012.747495. PMID: 23550847.

UDC 617-7

SURGERY TECHNOLOGIES APPLICATION BASED ON PHYSICAL PRINCIPLES

Stanislav Popov,
meastrojoshi@gmail.com

Oleksiy Lebedev,
biowelding@gmail.com

Department of Biomedical Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

Abstract - This paper describes modern methods of welding and dissecting living tissues used in surgery. The authors compare the advantages and disadvantages of methods based on three physical principles. Contact welding, which is based on the use of high-frequency electric current to denature proteins and form a strong bond. Laser surgery, which uses laser energy to heat and coagulate tissues. Ultrasonic surgery, which uses ultrasonic waves to join tissues, as well as to destroy tumors, fuse tissues, etc.

Promising areas of development for these technologies are also described, such as the use of ultrasound in dentistry (ultrasonic scalpel); high-frequency electrosurgical welding to restore the integrity of stem cells and nerves; laser surgery in dentistry; ultrasonic surgery for fixing biodegradable plates in fractures of the lower jaw in children; high-frequency welding of living tissues (HF LTW) in pediatric lung surgery; electric welding for colorectal anastomosis; laser welding with an argon laser to connect the walls of the intestine; laser welding with nanocomposite material to seal ruptures in the small intestine..

Methods. A comprehensive systematic review summarizing the state of research on LTS of living tissues based on articles indexed in Scopus, WoS, DOAJ, and Google Scholar.

Keywords: surgery, contact welding, laser surgery, ultrasonic surgery.