

PAMELA

Хірургічні методики профілактики та лікування фантомного болю

Навчальні цілі

1

Типи болю після ампутації

2

Хірургічні методики профілактики та лікування фантомного болю

3

Післяопераційний догляд

4

Міркування щодо бойових ампутацій

Типи болю після ампутації

А) Біль, спричинений невромою (NP)

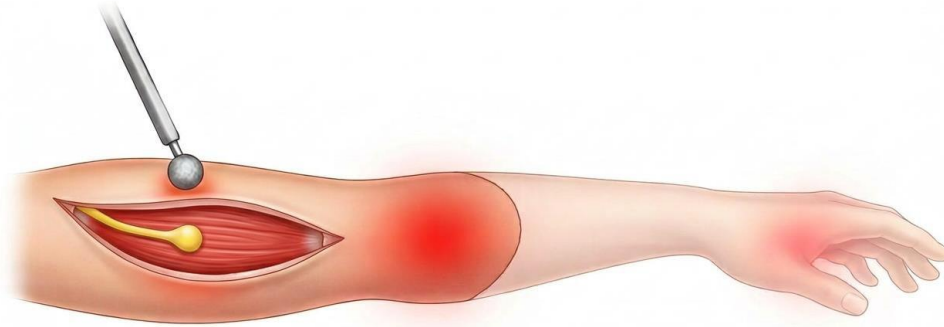
Нейропатичний біль від перетнутих нервів

В) Біль у куксі (RLP):

біль у ділянці кукси

С) Фантомний біль (PLP):

біль у відсутній кінцівці

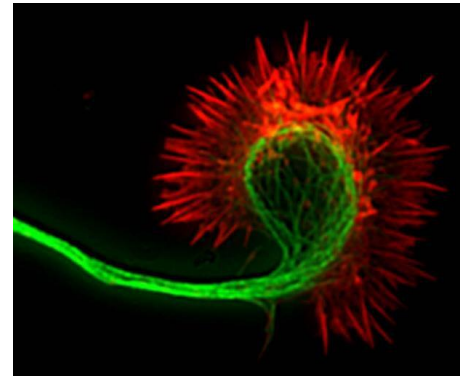


До 79.9% повідомляють про PLP; 67.7% повідомляють про RLP/NP ¹¹

А) Біль, спричинений невромною (NP)

Периферичні нерви втрачають контакт зі своїми органами-мішенями при втраті кінцівки. Після травматичної ампутації нерва складний процес, що активує здатність нервової клітини до регенерації, запускається поблизу місця ампутації.¹³ Тоді як валлерівська дегенерація спричиняє розпад і деградацію дистального аксона внаслідок втрати контакту з нервовою клітиною, проксимальна дегенерація зазвичай відбувається лише дуже обмеженою мірою, як правило, до наступного перехвату Ранв'є.¹⁴

Упродовж цього процесу кожен окремий аксон знову починає розростатися проксимально, намагаючись знайти відповідний орган-мішень. Так званий **«конус росту»** – спеціалізована рухома структура, з якої відходять численні пальцеподібні відростки, – розташований на верхівці аксона, що регенерує. Регенерація має в ідеалі відбуватися у напрямку дистальної кукси нерва, і це визначається конусом росту. У разі ампутації дистальна кукса нерва втрачається, тому аксони, що регенерують, зазвичай не знаходять відповідної «мішені». Це призводить до неконтрольованого росту нервових волокон, що зрештою спричиняє розвиток невром.



Авторські права: Kalil, Katherine et al.⁶⁵

А) Біль, спричинений невромою (NP)

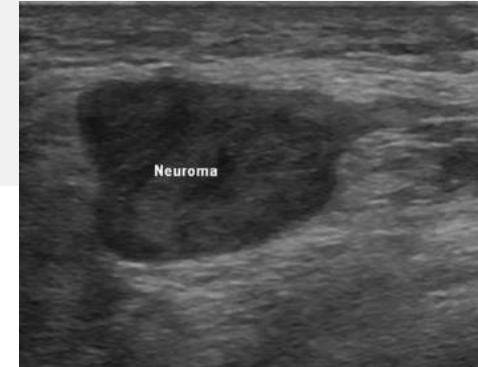
Нейропатичний біль, спричинений невромою, можна пояснити тим, що нервові волокна всередині неї є доведено високочутливими та здатні генерувати імпульси спонтанно.^{15–17}

Симптоми болю, спричиненого невромою:

- Алодинія: больове відчуття, спричинене подразниками, які зазвичай не викликають болю
- Гіперальгезія: посилене больове відчуття у відповідь на больові подразники
- Позитивний симптом Гоффмана-Тінеля: дискомфорт, який виникає при постукуванні по нерву та іррадіює в зону, яку іннервує цей нерв¹

Другий етап:

- Візуалізація невроми за допомогою УЗД.
- Діагностична інфільтрація під УЗД-контролем місцевим анестетиком.
- Позитивним результатом є тимчасове зменшення або усунення болю.¹



А) Біль, спричинений невромою: діагностичні критерії

Мають бути виконані всі три наведені нижче критерії

- Біль, що має щонайменше три з наведених нижче характеристик: пекучий, різжучий, стріляючий, електризуючий, парестезія, оніміння або холодова непереносимість
- Симптоми, що обмежуються чітко визначеною нейроанатомічною ділянкою
- Наявність в анамнезі даних про фактичне або підозрюване ушкодження нерва

Крім того, має бути виконаний щонайменше один із наведених нижче критеріїв:

- Позитивний **симптом Гоффмана-Тінеля** (для шкірних нервів)
- Відповідь на інфільтрацію місцевим анестетиком
- Підтвердження наявності невроми за допомогою візуалізації (нейросонографія, МРТ)

В) Біль у куксі

Біль у куксі локалізується в куксі та сприймається як біль через ноцицептори.

Біль, спричинений невромою (NP), також класифікують як RLP

З огляду на нещодавні дані важливо **розрізняти RLP та PLP**, оскільки відбулася потенційна зміна у підході до лікування болю, пов'язаного з ампутацією.

Хоча хірургічні втручання колись вважали неефективними в лікуванні PLP, нещодавні дослідження свідчать про протилежне, що підкреслює потребу в подальшому вивченні та клінічному розгляді зв'язку між RLP та PLP.²⁻⁴

С) Фантомний біль: походження



Точний механізм, що лежить в основі розвитку фантомного болю, наразі вивчається та **ще не був остаточно встановлений**⁵.

Дослідження свідчать, що РЛР зумовлений периферичними, спінальними та центральними патомеханізмами, які призводять до **дезадаптивної кіркової реорганізації** з подальшим відчуттям болю або дискомфорту в кінцівці, якої більше немає.

Безболісні відчуття ампутованої частини тіла називають **фантомними відчуттями**.¹

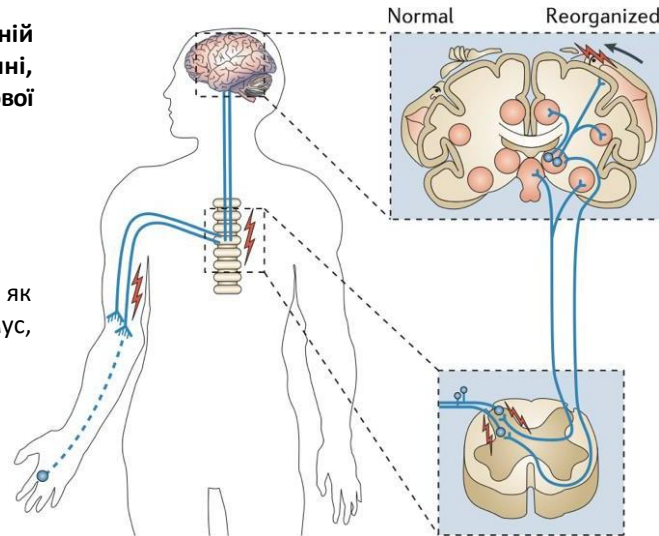
Фантомні відчуття, на відміну від фантомного болю, зазвичай не потребують специфічних лікувальних втручань.

Однак важливо забезпечити навчання пацієнтів щодо вирішення проблеми фантомних відчуттів, щоб сприяти їхньому розумінню та вирішувати потенційні проблеми, пов'язані з цим досвідом.

C) Фантомний біль: походження

Біль, що відчувається у фантомній кінцівці, охоплює як периферичні, так і центральні компоненти нервової системи (ЦНС)

- Кукса
- Ганглії заднього корінця
- Спинний мозок
- Надспінальні центри, такі як стовбур головного мозку, таламус, кора та лімбічна система.²⁰



Central changes

- Unmasking
- Sprouting
- General disinhibition
- Map remodelling
- Loss of neurons and neuronal function
- Denervation
- Alterations in neuronal and glial activity
- Sensory-motor and sensory-sensory incongruence

Peripheral changes

- Structural changes in neurons and axons
- Ectopic impulses
- Ephaptic transmission
- Sympathetic-afferent coupling
- Down- and upregulation of transmitters
- Alterations in channels and transduction molecules
- Selective loss of unmyelinated fibres

С) Фантомний біль (PLP): лікування

Упродовж десятиліть хірургічні втручання з приводу фантомного болю (PLP) та болю, спричиненого невромою, демонстрували обмежену ефективність.

Останніми роками **таргетна м'язова реіннервація (TMR)** та **регенеративний інтерфейс периферичного нерва (RPNI)** стали перспективними методиками для покращення керування протезом та зменшення болю.⁶

Підхід TMR та RPNI потребує додаткових навичок і операційного часу, тому вкрай важлива ретельна оцінка показань та потенційної користі.



Попри зростання інтересу до цих методик, порівняльних досліджень та рандомізованих контрольованих досліджень (РКД) наразі бракує для визначення відносної ефективності кожного підходу.

У відповідь на потребу в доказах подвійне сліпе РКД¹² (NCT05009394) було розпочато для порівняння ефективності TMR, RPNI та активного контролю (висічення невроми та занурення нерва в м'яз) у зменшенні болю у куksі, болю, спричиненого невромою, та фантомного болю. Це дослідження, що охоплює кілька країн, передбачає спостереження за пацієнтами протягом 4 років. Це узгоджується з нагальною потребою вирішувати проблему фантомного болю, який уражає значну частку осіб після ампутації великих сегментів кінцівок і глибоко впливає на якість їхнього життя. Розрізнення фантомного болю та болю, спричиненого невромою, є вкрай важливим, оскільки обидва типи болю мають унікальні характеристики та потребують індивідуалізованих втручань.

2. Хірургічні методики профілактики та лікування фантомного болю

Інноваційні хірургічні методики, такі як

A) Таргетна м'язова реіннервація (TMR)

B) Таргетна сенсорна реіннервація (TSR)

C) Регенеративний інтерфейс периферичного нерва (RPNI)

надають конкретне призначення перетнутим нервовим закінченням, забезпечуючи чіткий напрямок їхнього росту та потенційно запобігаючи їхній дезорганізації.

2. Хірургічні методики

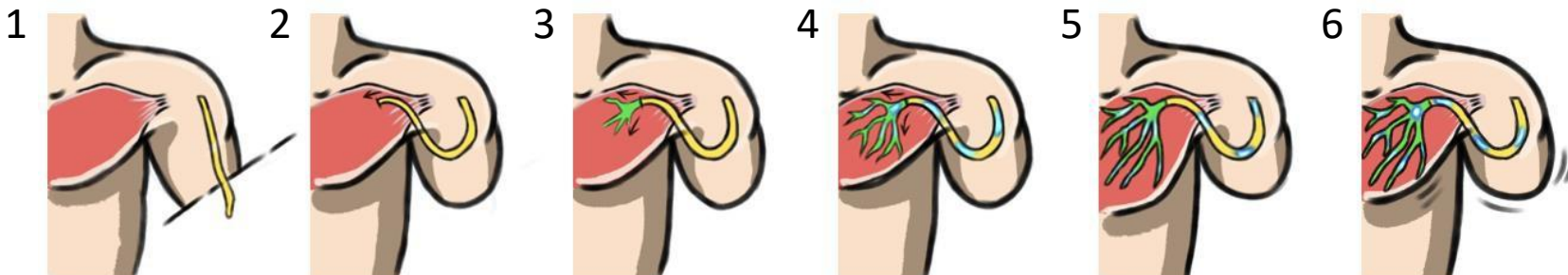
А) Таргетна м'язова реіннервація (TMR)

2. Хірургічні методи: TMR

Принцип таргетної м'язової реіннервації (TMR) полягає у перенаправленні уражених проксимальних кукс нервів до меншої рухової гілки нерва, яка веде до інтактного м'яза. Цей денервований м'яз потім реіннервується шляхом первинної коаптації «кінець у кінець» у точці входження нерва, що дає змогу аксонам, які проростають, увійти в рухову гілку нерва та згодом реіннервувати денервовану м'язову тканину або рухові кінцеві пластинки.

1. Ідентифікуйте донорський нерв за допомогою тупої дисекції та обережно виділіть донорський нерв під збільшенням лупи, за потреби використовуючи мікрохірургічні інструменти. Мобілізуйте донорський нерв на довжину, необхідну для досягнення реципієнтної ділянки.
2. Ідентифікуйте всі рухові гілки нерва до цільового м'яза за допомогою тупої дисекції. Перенесіть донорський нерв до цільового м'яза та коаптуйте дистальний кінець перетнутого рухового нерва шляхом неврорафії «кінець у кінець».

3.-6. Це забезпечує нерв напрямною структурою, за якою він проростає в м'яз і реіннервує його.



2. Хірургічні методики: TMR

Спочатку розроблена для біонічного протезування, ця методика передбачала коаптацію сліпо закінчених нервів до вибраних м'язових гілок з метою збільшення кількості окремих моторизованих сигналів, які використовуються для керування протезом. Побічно виявлено перевагою була дуже низька частота формування больових невром та зменшення PLP. Подальші дослідження продемонстрували відмінні результати щодо обох видів болю.^{6,29,30}

Метод таргетної м'язової реіннервації (TMR) призначений не лише для лікування макроукс; його також можна застосовувати для усунення больових невром пальців. TMR є вдосконаленим терапевтичним підходом порівняно з ізольованою хірургічною резекцією або простим зануренням нерва в м'яз.⁸

2. Хірургічні методики: TMR

Хірургічний алгоритм

Стандартизований протокол хірургічного втручання було нещодавно опубліковано, і його стисло викладено нижче.³²

1. Передопераційна підготовка

1. Діагностуйте больову неврому (невроми): для болю, спричиненого невромою, **застосовують фізичну** стимуляцію у формі пальцевого тиску (наприклад, тест на симптом Тінеля), щоб викликати біль у місці передбачуваної невроми. Фізичну стимуляцію не застосовують для провокування болю у куксі або PLP; натомість учасників просять заплющити очі та локалізувати біль, щоб розрізнити ці два типи. У випадках, коли легке втискання шкіри спричиняє RLP, ділянку можна місцево знеболити, щоб зменшити його та виявити біль, спричинений невромою, під час фізичної стимуляції. Біль, спричинений невромою, також можна розрізнити за дистально відображеними больовими відчуттями, які він викликає у фантомній кінцівці під час фізичної стимуляції. Слід застосувати щонайменше один із таких методів, щоб задокументувати наявність болю, спричиненого невромою: сумісна симптоматика, тест на симптом Тінеля, візуалізаційні методи (УЗД або МРТ) чи блокада нерва.¹²
2. Проведіть ретельне фізикальне обстеження для виявлення потенційних цільових м'язів та оцініть рухливість м'язих тканин, що оточують нерв. Виконайте ЕМГ-оцінку цих цільових м'язів у разі, якщо скорочення м'яза важко піддається оцінюванню.
3. Сплануйте шкірні розрізи залежно від результатів кроків 1.1 та 1.2

ТЕРМІНИ

- **Донорський нерв:** нерв із больовою невромою, який має бути перенесений до реципієнтного залишкового або «цільового» нерва.
- **Реципієнтний залишковий нерв:** перетятий сегмент нерва (свіжо підготовлена кукса нерва), який нативно іннервує цільовий м'яз.
- **Цільовий м'яз:** життєздатний м'яз, який іннервується реципієнтним залишковим або «цільовим» руховим нервом у куксі або поблизу неї.

2. Хірургічні методики: TMR

Хірургічний алгоритм

2. Підготовка донорського нерва

1. Виконайте регіонарну або загальну анестезію без застосування міорелаксантів, щоб забезпечити ефективну стимуляцію нерва. Залежно від запланованої ампутації або локалізації больової невроми, розмістіть пацієнта в положенні на спині або на животі. Для верхньої кінцівки використайте хірургічну підставку для руки.
2. Виконайте шкірний розріз скальпелем. Довжина та форма шкірного розрізу залежать від наявних м'яких тканин або локалізації больової невроми.
3. Ідентифікуйте донорський нерв або больову неврому шляхом тупої дисекції.
4. Обережно виділіть донорський нерв або неврому під збільшенням лупи, застосовуючи мікрохірургічні інструменти за потреби.
5. Мобілізуйте донорський нерв на таку довжину, якої достатньо для досягнення реципієнтної ділянки, враховуючи, що подальші шви нерва мають бути без натягу в усьому обсязі рухів у проксимальних суглобах. Перетніть неврому або перетніть нерв за допомогою комерційного набору для перетину/підготовки нерва.
6. Повторіть етапи 2.4-2.6 для кожного нерва з виявленою больовою невромою в поточній оголеній ділянці.

ПРИМІТКА

Тип анестезії залежить від локалізації втручання.

ПРИМІТКА

Виділення невроми є необов'язковим

ПРИМІТКА

Резекція невроми є необов'язковою, якщо вона утруднена.

2. Хірургічні методики: TMR

Хірургічний алгоритм

3. Ідентифікація рухової точки

1. Ідентифікуйте всі рухові гілки нерва до цільового м'яза шляхом тупої дисекції.
 1. Установіть ручний нервовий стимулятор на 0.5-1.0 мА, приведіть його в контакт із гілками нерва та стимулюйте кожну з них. Під час стимуляції нерв, який забезпечує найбільше скорочення м'яза, буде використаний як реципієнтний нерв. У наведеній нижче таблиці (Таблиця 1) наведено рекомендовані цільові м'язи для кожного нерва на конкретному рівні ампутації.
 2. Використовуйте відомі найбільш проксимальні точки іннервації, коли це можливо.
 3. Денервуйте цільовий м'яз повністю, коли це можливо.
2. Після підтвердження активного скорочення перетніть нерв прямими мікроножицями без натягу якомога ближче до точки його входження. Орієнтуйтеся на відстань менше ніж 1 см.
3. Перемістіть проксимальний кінець перетнутого реципієнтного нерва проксимально, від місця коаптації без будь-яких спеціальних маніпуляцій.

2. Хірургічні методики: TMR

Рівень	Донорський нерв	Рекомендований цільовий м'яз(и)
Екзартикуляція плеча	М'язово-шкірний	Великий грудний м'яз – ключична частина
	Серединний	Великий грудний м'яз – грудинна частина
	Ліктьовий	Великий грудний м'яз – розщеплена грудинна частина
		Малий грудний м'яз
		Найширший м'яз спини
		Передній зубчастий м'яз
Трансгумеральний	Променевий	Найширший м'яз спини
		Великий грудний м'яз - розщеплена грудинна частина
		Передній зубчастий м'яз
	М'язово-шкірний	Двоголовий м'яз плеча – довга головка
		Серединний
		Двоголовий м'яз плеча – коротка головка
Трансрадіальний	Ліктьовий	Плечовий м'яз
		Двоголовий м'яз плеча – коротка головка
		Триголовий м'яз плеча – латеральна головка
	Променевий – дистальна гілка	Триголовий м'яз плеча – довга головка
		Променевий – проксимальна гілка
		Поверхневий згинач пальців
Трансгумеральний	Серединний	Глибокий згинач пальців
		Ліктьовий згинач зап'ястка
		Довгий згинач великого пальця
	Ліктьовий	Променевий розгинач зап'ястка
		Глибокий згинач пальців
		Плечо-променевий м'яз

Рівень	Донорський нерв	Рекомендований цільовий м'яз(и)
Екзартикуляція стегна	Сідничний	Якщо задній стегновий клапоть збережено:
		Напівперетинчастий м'яз
		Напівсухожилковий м'яз
		Двоголовий м'яз стегна
		Якщо медіальний стегновий клапоть збережено:
		Тонкий м'яз
	Стегновий нерв	Довгий привідний м'яз
		Великий привідний м'яз
		Короткий привідний м'яз
		Кравецький м'яз (за наявності) або затульний нерв нерва
		Прямий м'яз стегна
		Латеральний широкий м'яз стегна
	Підшкірний	Кравецький м'яз (за наявності) або невротизація затульним нервом
		Збережено в клапті
	Затульний	Напівперетинчастий м'яз
		Напівсухожилковий м'яз
		Двоголовий м'яз стегна
		Кравецький м'яз
	Латеральний шкірний нерв стегна	Напівперетинчастий м'яз
		Тонкий м'яз
		Довгий привідний м'яз
		Великий привідний м'яз
	Задній шкірний нерв стегна	Короткий привідний м'яз

Рівень	Донорський нерв	Рекомендований цільовий м'яз(и)
Трансфеморальний	Сідничний - малоогомілковий компонент	Двоголовий м'яз стегна
	Сідничний - задня великогомілкова частина	Напівсухожилковий м'яз
	Підшкірний	Напівперетинчастий м'яз
	Задній шкірний нерв стегна	Медіальний широкий м'яз стегна
		Двоголовий м'яз стегна - дистальна рухова гілка
		Камбалоподібний м'яз
Трансбітальний	Задній великогомілковий	Медіальна головка литкового м'яза
		Довгий згинач пальців
	Загальний малоогомілковий	Латеральна головка литкового м'яза
		Медіальна головка литкового м'яза
	Глибокий малоогомілковий	Передній великогомілковий м'яз
	Поверхневий малоогомілковий	Довгий розгинач пальців
		Довгий малоогомілковий м'яз
	Медіальний литковий	Довгий згинач великого пальця стопи
		Медіальна головка литкового м'яза
Трансгумеральний	Латеральний литковий	Латеральна головка литкового м'яза

Таблиця 1: рекомендовані цільові м'язи для кожного нерва на конкретному рівні ампутації.³² Адаптації, визначені індивідуальним випадком пацієнта, завжди можливі.

2. Хірургічні методики: TMR

4. Коаптація нерв-до-нерва

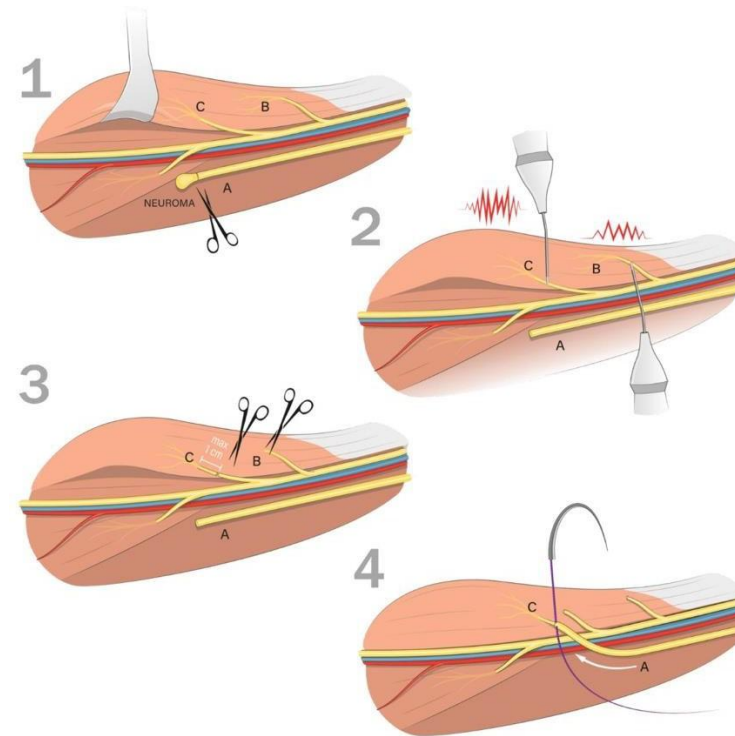
1. Підшийте донорський нерв до реципієнтного залишкового або «цільового» рухового нерва швом 8 - 0 з нерозсмоктувального монофіламенту, розміщуючи стібок у центрі донорського нерва.
2. Підсильте двома або трьома швами 8 - 0 з нерозсмоктувального монофіламенту, які фіксують епіневрій донорського нерва до фасції та епімізію, що оточують реципієнтний нерв. Переконайтеся, що коаптацію виконано без натягу та без надмірної надлишковості.
3. Ушийте операційні рани пошарово.

ПРИМІТКА

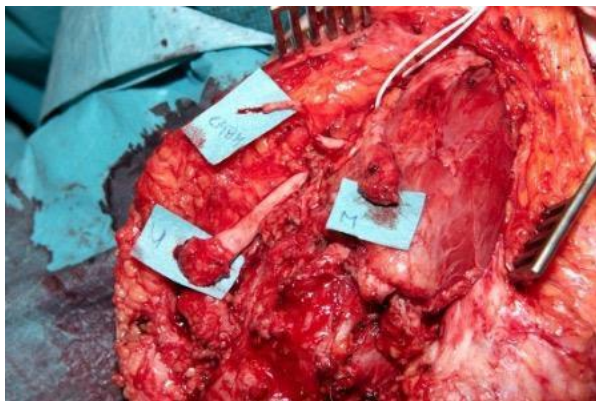
Кожен донорський нерв має більший калібр і більшу кількість пучків, ніж реципієнтний руховий нерв. Значна невідповідність зазвичай трапляється

2. Хірургічні методики: TMR

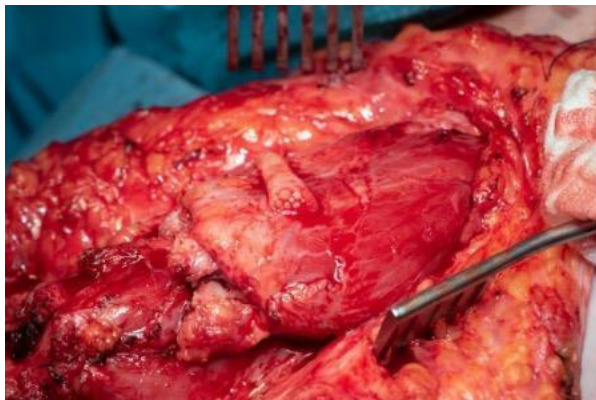
- 1) Ідентифікуйте та виділіть донорський нерв із больовою невромом (A). Мобілізуйте донорський нерв і перетніть неврому до рівня здорових нервових пучків.
- 2) Ідентифікуйте руховий нерв (нерви) до цільового м'яза та підтвердьте скорочення м'яза за допомогою ручного нервового стимулятора.
- 3) Якщо виявлено кілька рухових гілок, оберіть ту рухову гілку, яка спричиняє найбільше скорочення (C). Перетніть нерв без натягу якомога ближче до місця його входження (максимум 1 см). За можливості денервуйте інші виявлені рухові гілки до того самого м'яза (B).
- 4) Підшийте підготовлений донорський нерв до реципієнтного залишкового або «цільового» нерва, розмістивши стібок у центрі донорського нерва. Підсильте двома або трьома мікрошвами, які фіксують епіневрій донорського нерва до фасції та епімізію, що оточують реципієнтний нерв.



2. Хірургічні методики: TMR



Ідентифікуйте донорський нерв або больову неврому шляхом тупої дисекції. Обережно виділіть донорський нерв або неврому під збільшенням лупи, використовуючи мікрохірургічні інструменти за потреби. Мобілізуйте донорський нерв настільки, наскільки це необхідно для досягнення реципієнтної ділянки, враховуючи, що подальші нервові шви мають бути вільними від натягу в усьому обсязі рухів у проксимальних суглобах.



Перетніть неврому або перетніть нерв за допомогою комерційного набору для перетинання/підготовки нерва.

2. Хірургічні методики: TMR

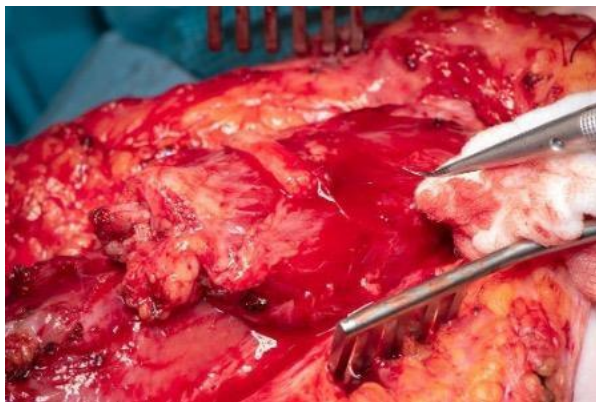


Ідентифікуйте всі рухові гілки нерва до цільового м'яза шляхом тупої дисекції. Установіть ручний нервовий стимулятор на 0.5-1.0 мА, приведіть його в контакт із гілками нерва та стимулюйте кожну з них. Під час стимуляції нерв, який забезпечує найбільше скорочення м'яза, і буде використаний як реципієнтний нерв.

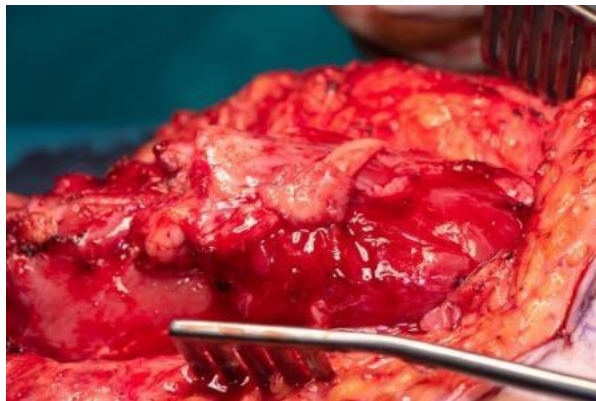


Після підтвердження активного скорочення перетніть нерв прямими мікроножицями без натягу якомога ближче до точки його входження. Прагніть до відстані менше ніж 1 см. Перемістіть проксимальний кінець перетятого реципієнтного нерва проксимально, віддаливши його від місця коаптації, без будь-яких специфічних маніпуляцій.

2. Хірургічні методики: TMR



Підшийте донорський нерв до реципієнтного залишкового або «цільового» рухового нерва за допомогою 8 - 0 нерозсмоктувального монофіламентного шва, розташовуючи стібок у центральній частині донорського нерва. ПРИМІТКА: кожен донорський нерв має більший калібр і містить більше пучків, ніж реципієнтний руховий нерв. Зазвичай спостерігається значна невідповідність. Укріпіть двома або трьома 8 - 0 нерозсмоктувальними монофіламентними швами, які фіксують епіневрій донорського нерва до фасції та епімізію, що оточують реципієнтний нерв.



Переконайтеся, що коаптацію виконано без натягу та без надмірної надлишковості. Щоб уникнути розростання аксонів поза епіневральним нервовим швом, стандартний RPNI обгортають навколо ділянки коаптації, див. розділ RPNI. Ушийте операційні рани пошарово.

2. Хірургічні методики: TMR

Усунення проблем та міркування

Felder та співавт.³³ повідомили про досвід технічних труднощів, таких як

- надлишкова довжина нерва
- невідповідність розмірів
- утворення невроми
- розташування місць коаптації
- повна денервація м'яза у цільовій ділянці
- вибір оптимальної цілі для функціональності протеза

2. Хірургічні методики

Таргетна сенсорна реіннервація (TSR)

2. Хірургічні методики: TSR

Принципи таргетної сенсорної реіннервації

Вплив сенсорного зворотного зв'язку на керування протезами, а також пов'язані з цим покращення втілення та зменшення фантомного болю підтверджено численними науковими дослідженнями.^{34–36}

Процес TSR полягає у вибірковій реіннервації визначеної ділянки шкіри шляхом з'єднання сенсорного донорського нерва з ділянки ампутації з визначеною сенсорною шкірною гілкою. Це дозволяє стимулювати ділянку шкіри синхронно з функцією протеза за допомогою системи сенсорного зворотного зв'язку, яку можна інтегрувати в систему гільзи.

Ця методика може забезпечувати сенсорний зворотний зв'язок, і було показано, що покращує функціональність та втілення протеза.^{1,38}

ПРИМІТКА

Під час процедури TMR шкіра, що вкриває цю ділянку, реіннервується шляхом перенаправлення змішаних донорських нервів, що містять сенсорні та рухові нервові волокна до прилеглих м'язових мішеней. Це сприяє відновленню чутливості та рухового контролю в неспрямований спосіб.^{39–41}

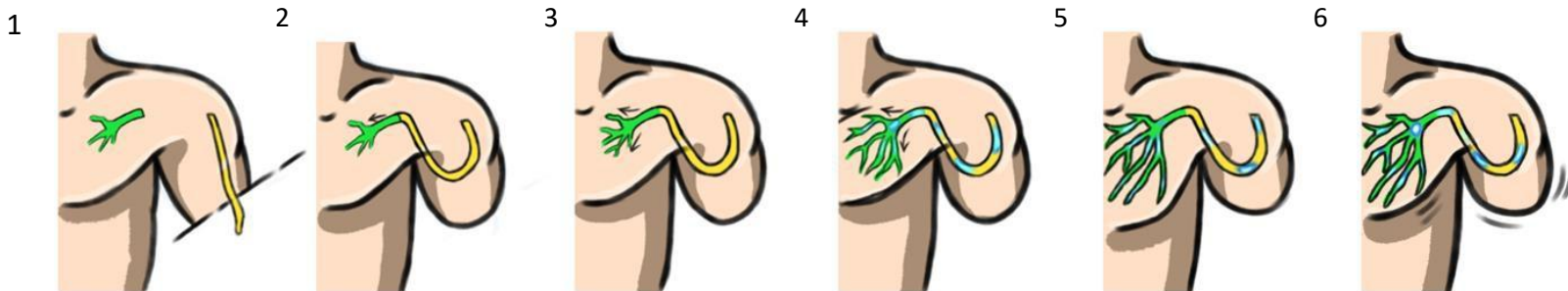
2. Хірургічні методики: TSR

Донорський нерв	Реципієнтний нерв (TSR)	Реіннервована ділянка шкіри та чутливість	Джерело
Серединний Нерв	Пучок серединного нерва було коаптовано до міжреброво-плечового шкірного (T2)	Він іннервує шкіру, що вкриває медіальну поверхню плеча	Herbert (2014)
Ліктьовий нерв	Пучок ліктьового нерва було з'єднано зі шкірною гілкою пахвового нерва	Він іннервує шкіру, що вкриває нижню ділянку дельтоподібного м'яза (зона полкового знаку)	Herbert (2014)
Литковий нерв	Транстибіальна (TT): транспозиція іпсилатерального литкового нерва до шкірної території підшкірного нерва	Він іннервує ділянку шкіри на передній та медіальній поверхні гомілки	Gardetto (2021)
Литковий нерв	Трансфеморальна (TF): трансплантація контралатерального литкового нерва як аутологічного трансплантата від дистальної кукси сідничного нерва до шкірної території латерального шкірного нерва стегна	Він іннервує шкіру, що вкриває латеральну поверхню стегна	Gardetto (2021)

Таблиця 2: Протоколи цільової сенсорної реіннервації (TSR)

2. Хірургічні методи: TSR

1. Ідентифікуйте донорський нерв за допомогою тупої дисекції та обережно виділіть донорський нерв під збільшенням лупи, за потреби використовуючи мікрохірургічні інструменти. Мобілізуйте донорський нерв на довжину, необхідну для досягнення реципієнтної ділянки.
2. Ідентифікуйте всі сенсорні гілки нерва до цільового м'яза шляхом тупої дисекції. Перенесіть донорський нерв до визначеної чутливої шкірної гілки та коаптуйте дистальний кінець перетнутого сенсорного нерва шляхом невронафії «кінець у кінець».
- 3.-6. Це забезпечує нерв прямою структурою, що вросла в шкіру, знаходячи шкірні рецептори та реіннервуючи відповідну ділянку шкіри.



2. Хірургічні методики: TSR

1. Підготовка донорського та реципієнтного нерва

1. Виконайте або регіонарну, або загальну анестезію без застосування міорелаксантів, щоб забезпечити ефективну стимуляцію нерва. ПРИМІТКА: тип анестезії залежить від місця проведення втручання.
2. Розташуйте пацієнта належним чином, щоб забезпечити доступ до операційного поля, залежно від запланованої ампутації або локалізації больової невроми.
3. Виконайте розріз шкіри скальпелем. Довжина та форма розрізу шкіри залежать від наявних м'яких тканин або розташування больової невроми.
4. Ідентифікуйте донорський нерв або больову неврому шляхом тупої дисекції.
5. Ідентифікуйте реципієнтний нерв шляхом тупої дисекції.
6. Обережно ізолюйте донорський та реципієнтний нерви невроми під збільшенням за допомогою мікрохірургічних інструментів за потреби.
7. Мобілізуйте донорський нерв настільки, наскільки це необхідно для досягнення реципієнтної ділянки, враховуючи, що подальші нервові шви мають бути вільними від натягу в усьому обсязі рухів у проксимальних суглобах. Перетніть реципієнтний нерв або перетніть больову неврому за допомогою комерційного набору для перетинання/підготовки нерва.
8. Перемістіть кінець донорського нерва до дистального перетнутого реципієнтного нерва.
9. Занурте проксимальний кінець перетнутого нерва подалі від місця коаптації та поверхні. RPNІ можна застосувати до проксимального кінця перетнутого нерва.

2. Хірургічні методики: TSR

2. Коаптація нерв-до-нерва

1. Підшийте донорський нерв до реципієнтного залишкового або «цільового» рухового нерва за допомогою 8 - 0 нерозсмоктувального монофіламентного шва або тоншого, накладаючи шов у центрі донорського нерва.
2. Укріпіть нитку двома або трьома нерозсмоктувальними монофіламентними швами 8-0, які фіксують епіневрій донорського нерва до навколишньої тканини реципієнтного нерва. Переконайтеся, що коаптацію виконано без натягу та без надмірної надлишковості.
3. Ушійте операційні рани пошарово.

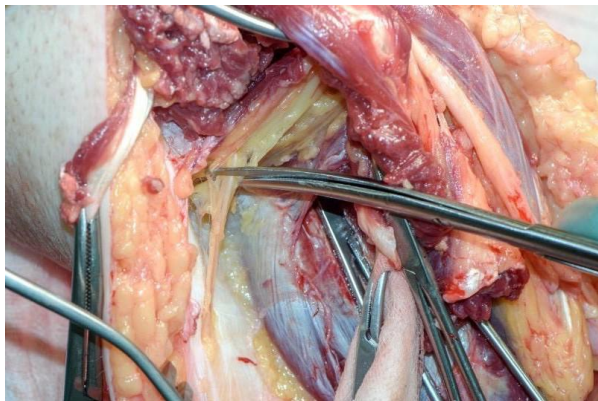
ПРИМІТКА

Кожен донорський нерв має більший калібр і містить більше пучків, ніж реципієнтний руховий нерв. Зазвичай спостерігається значна невідповідність.

2. Хірургічні методики: TSR



Ідентифікуйте всі сенсорні гілки нерва до цільової шкіри шляхом тупої дисекції.



Перетніть нерв прямими мікроножицями так, щоб довжина нерва дозволяла виконати коаптацію без натягу. Перемістіть проксимальний кінець перетнутого реципієнтного нерва проксимально, віддаливши його від місця коаптації. Занурте його в м'яз подалі від поверхні, щоб уникнути дії тиску, або обгорніть RPNI навколо нього.

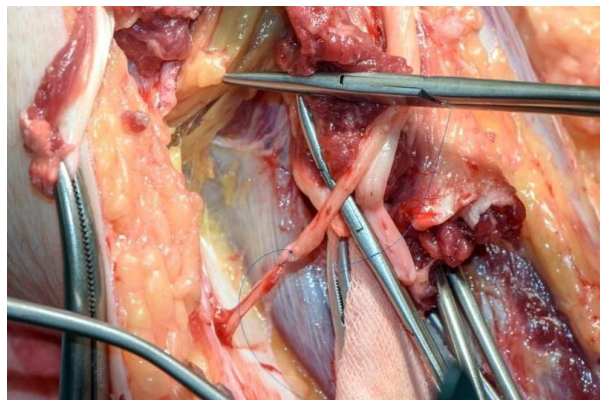
2. Хірургічні методики: TSR



Підшийте донорський нерв до реципієнтного залишкового або «цільового» сенсорного нерва за допомогою 8 - 0 нерозсмоктувального монофіламентного шва, накладаючи шов у центрі донорського нерва.

ПРИМІТКА

Кожен донорський нерв має більший калібр і містить більше пучків, ніж реципієнтний руховий нерв. Зазвичай спостерігається значна невідповідність.



Укріпіть двома або трьома 8 - 0 нерозсмоктувальними монофіламентними швами, які фіксують епіневрій донорського нерва до фасції та епімізію, що оточують реципієнтний нерв. Переконайтеся, що коаптацію виконано без натягу та без надмірної надлишковості. Ушийте операційні рани пошарово.

2. Хірургічні методики: TSR

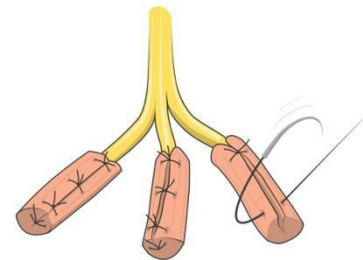
Усунення проблем та міркування

Повідомлений досвід технічних труднощів включає

- Надлишкова довжина нерва
 - Відстані між донорським і реципієнтним нервами
 - Невідповідність розмірів
 - Утворення невроми
 - Розташування місць коаптації
- Тимчасова або повна денервація шкіри в цільовій ділянці з можливою дизестезією
 - Вибір оптимальної цілі для функціональності протеза та системи зворотного зв'язку.³³

2. Хірургічні методики

Регенеративний інтерфейс периферичного нерва (RPNI)



2. Хірургічні методики: RPNI

Регенеративний інтерфейс периферичного нерва (RPNI) також описують як селективну невротизацію

- А) Аваскулярний, денервований м'язовий трансплантат слугує мішенню для аксонів кукси нерва, що регенерують.
- В) Окремі нерви розділяють інтерфасцикулярно, щоб сформувати кілька окремих нервових закінчень, або щоб полегшити проходження більшої кількості сигналів, або забезпечити аксони додатковою м'язовою тканиною для реіннервації.⁴⁴
- С) Цей процес дозволяє утворення нових нервово-м'язових з'єднань, які ефективно запобігають появі нових симптомів невропатії.

Порівняно з TMR ця процедура потребує значно **менше часу** і може **виконуватися немікрохірургами**.

Показано, що RPNI зменшують фантомний **біль** щонайбільше на 53 відсотки, а біль, спричинений невромою, – на 71 відсоток.^{1,8,42}

2. Хірургічні методи: RPNI

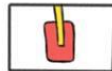


1. Ідентифікуйте здоровий донорський м'яз і візьміть м'язовий трансплантат.

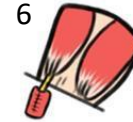
Вкрай важливо забезпечити життєздатність вільного м'язового трансплантата, обмеживши його розміри максимум до **30-40 мм у довжину, 15-20 мм у ширину та 5-6 мм у товщину**.^{42,44}



2. Ідентифікуйте та виділіть нерв. Перетніть можливу больову неврому.



3.-4. Розмістіть пучок у м'язовому трансплантаті та зафіксуйте нерв швами.



5.-6. Складіть м'язовий трансплантат навколо пучка та зафіксуйте швами.



7.-8. Виконайте тупу дисекцію в куксі, щоб створити захищену ділянку, де кожен RPNI може вільно розміщуватися поза опорними поверхнями кінцівки

2. Хірургічні методики: RPNI

Хірургічний алгоритм

Стандартизований хірургічний протокол було опубліковано нещодавно, і його стисло викладено нижче.⁴⁵

1. Передопераційна підготовка

1. Діагностуйте больову неврому (невроми) за наявності
2. Сплануйте шкірні розрізи залежно від результатів кроку 1.1 та залежно від локалізації кожної больової невроми.⁴⁶

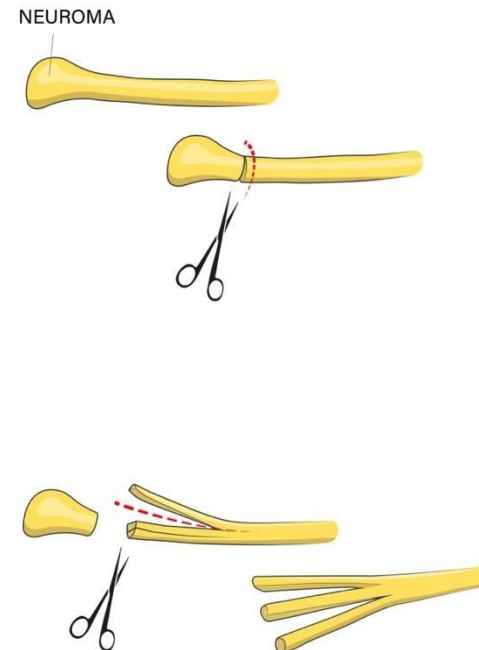
ПРИМІТКА

У принципі, будь-який здоровий скелетний м'яз можна використати; проте м'язовий трансплантат спочатку було рекомендовано забирати з латерального широкого м'яза стегна.

2. Хірургічні методики: RPNI

2. Підготовка реципієнтної ділянки

1. Виконайте регіонарну або загальну анестезію. ПРИМІТКА: Тип анестезії залежить від ділянки виконання процедури.
2. Розташуйте пацієнта у положенні лежачи на спині або на животі, залежно від запланованої ампутації або локалізації больової невроми. Для верхньої кінцівки покладіть руку на хірургічну підставку для руки.
3. Виконайте шкірний розріз, довжина та форма якого залежать від наявних м'яких тканин або локалізації больової невроми.
4. Ідентифікуйте нерв або больову неврому за допомогою тупої дисекції.
5. Обережно виділіть нерв або неврому за допомогою тонких інструментів. Використовуйте збільшення з лупою за потреби. ПРИМІТКА: виділення невроми є необов'язковим у складних випадках.
6. Мобілізуйте нерв і перетніть його або перетніть неврому до рівня здорових нервових пучків, використовуючи комерційний набір для перетинання/підготовки нерва. ПРИМІТКА: резекція невроми є необов'язковою у складних випадках
7. Виконайте поздовжні інтраневральні дисекції від дистального кінця нерва приблизно на **2-3 см прямими мікроножицями**. Кількість пучків залежатиме від рівня ампутації та розміру нерва. Переконайтеся, що діаметр кожного пучка становить щонайбільше 4-6 мм. Для кожного нерва рекомендована кількість нервових пучків, які слід підготувати, наведена в Таблиці 3.



2. Хірургічні методики: RPNI

Рівень ампутації	Нерв	Рекомендована кількість нервових пучків
Екзартикуляція плеча	Пахвовий	2
	М'язово-шкірний	2
	Серединний	3
	Ліктьовий	2
	Променевий	2
Трансгумеральний	Пахвовий	2
	М'язово-шкірний	2
	Серединний	3
	Ліктьовий	3
	Променевий	2
Трансрадіальний	Серединний	3
	Ліктьовий	2
	Променевий	1*
Екзартикуляція стегна	Сідничний	4
	Стегновий	3
	Латеральний шкірний	1*
	Стегновий	
	Затульний	1*
	Задній шкірний нерв стегна	2

Рівень ампутації	Нерв	Рекомендована кількість нервових пучків
Трансфеморальний	Сідничний	3
	Великогомілковий	2
	Глибокий	1*
	малогомілковий	
	Поверхневий	1*
	малогомілковий	
Транстибіальний	Литковий	1*
	Підшкірний	1*
	Великогомілковий	2
	Глибокий	2
	малогомілковий	
	Поверхневий	1*
	малогомілковий	
	Литковий	1*
	Підшкірний	1*

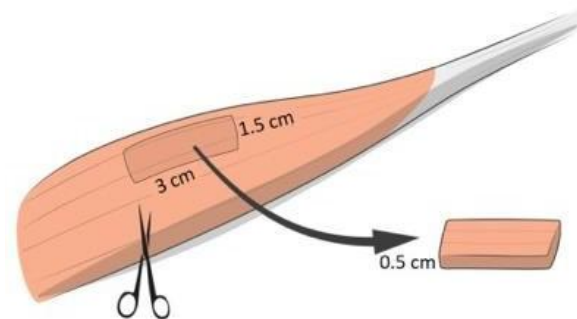
Таблиця 3: Рекомендована кількість нервових пучків, зазначена для кожного нерва на конкретному рівні ампутації. Адаптація відповідно до індивідуального випадку пацієнта завжди можлива.

* Використовувати нерв повністю

2. Хірургічні методики: RPNI

3. Підготовка донорської ділянки

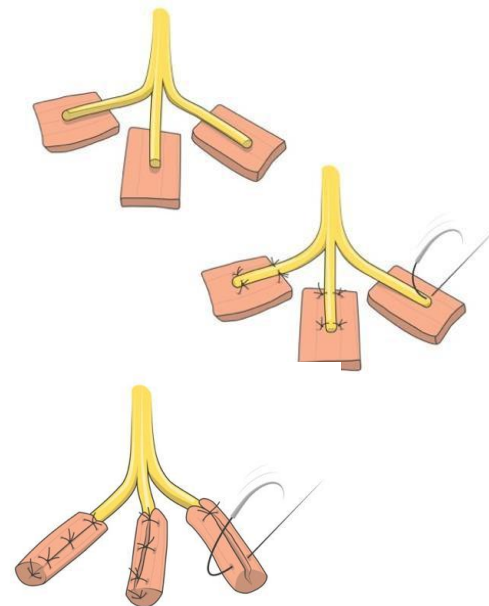
1. Ідентифікуйте здоровий власний донорський м'яз як джерело для отримання вільного м'язового трансплантата. Візьміть м'язовий трансплантат наступним чином:
 1. Переконайтеся, що кожен трансплантат має розміри **3 см (довжина) x 1.5 см (ширина) x 0.5 см (товщина)**.
ПРИМІТКА: Головна вісь має бути паралельною м'язовим волокнам.
 2. Виділіть м'язовий трансплантат за допомогою делікатних препарувальних ножиць уздовж головної осі м'язових волокон. За потреби використовуйте збільшувальні лупи.
 3. Обережно висічіть жирову тканину та м'язову фасцію з м'язового трансплантата за допомогою препарувальних ножиць.
2. Зберігайте забраний м'яз у вологій марлі з 0.9% стерильним NaCl до використання в розділі 4.
3. Повторіть кроки 3.1-3.2 для кожного м'язового трансплантата, виходячи з кількості нервів і відповідних нервових пучків, які потрібно обгорнути підготовленим вільним м'язовим трансплантатом для конструкції RPNI.



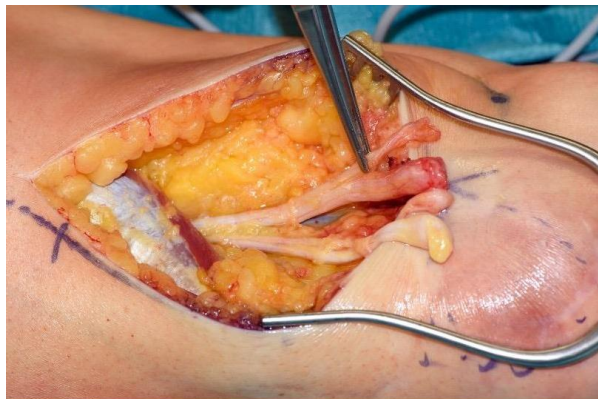
2. Хірургічні методики: RPNi

4. Виготовлення конструкції RPNi

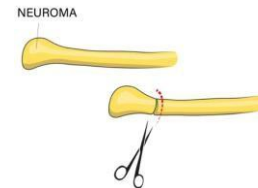
1. Оголіть нерв, який уже виділено та розділено на пучки.
2. Розмістіть пучок на м'язовому трансплантаті так, щоб дистальна кукса **потрапляла в центральну або проксимальну третину м'язового трансплантата, зберігаючи його орієнтацію паралельно м'язовим волокнам**. ПРИМІТКА: Паралельна орієнтація є кращою, щоб оптимізувати успішну аксональну реіннервацію.
3. Зафіксуйте куксу нерва в центрі поздовжньої осі м'язового трансплантата за допомогою 6 - 0 нерозсмоктувальних монофіламентних швів. Накладіть ще один шов, щоб зафіксувати нерв біля проксимального краю м'язового трансплантата. ПРИМІТКА: Не вшивайте кінець нерва в м'язовий трансплантат; перетнута частина нерва залишається вільною.
4. Складіть м'язовий трансплантат навколо пучка та зафіксуйте його вузловим або безперервним нерозсмоктувальним монофіламентним швом 6-0.
5. Повторіть кроки 4.1 - 4.4 для кожного пучка.
6. Виконайте тупу дисекцію в куксі, щоб створити захищену ділянку, де кожен RPNi може вільно розміщуватися поза опорними поверхнями кінцівки. За можливості зміщуйте розташування кожного RPNi послідовно.
7. Ушийте операційні рани пошарово.



2. Хірургічні методи: RPNI

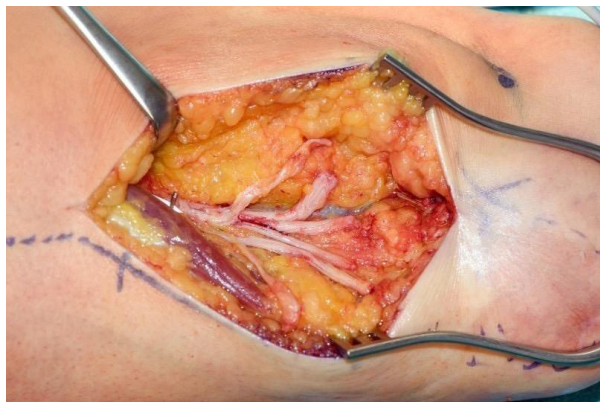


1. Ідентифікуйте нерв або больову неврому за допомогою тупої дисекції. Обережно виділіть нерв або неврому за допомогою тонких інструментів. Використовуйте збільшення з лупою за потреби.

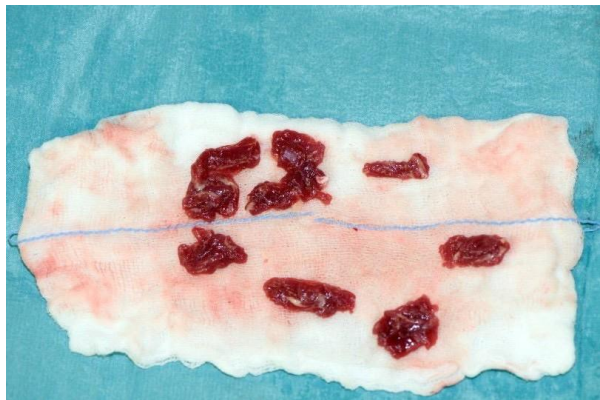
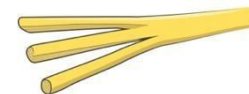


2. Мобілізуйте нерв і перетніть його або перетніть неврому до рівня здорових нервових пучків, використовуючи комерційний набір для розсічення/препарування нервів.

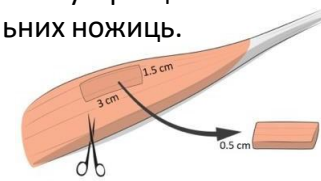
2. Хірургічні методики: RPNI



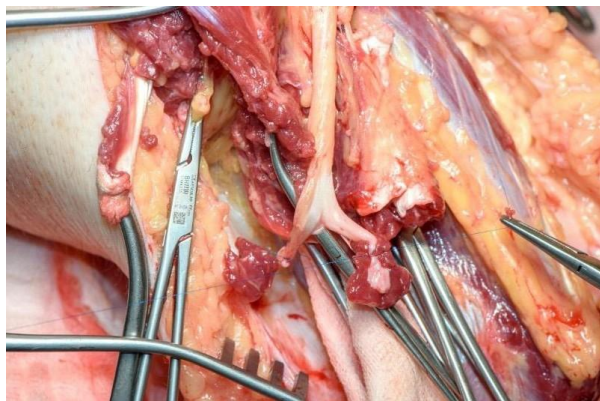
3. Виконайте поздовжні інтраневральні дисекції від дистального кінця нерва на довжину близько 2-3 см прямими мікроножицями. Кількість пучків залежатиме від рівня ампутації та розміру нерва. Переконайтеся, що діаметр кожного пучка становить максимум 4-6 мм.



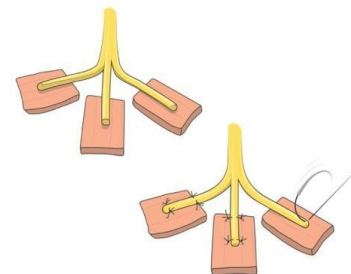
4. Ідентифікуйте здоровий власний донорський м'яз як джерело для отримання вільного м'язового трансплантата. Візьміть м'язовий трансплантат таким чином: а) Переконайтеся, що кожен трансплантат має розміри 3 см (довжина) x 1.5 см (ширина) x 0.5 см (товщина). б) Виділіть м'язовий трансплантат за допомогою тонких препарувальних ножиць уздовж головної осі м'язових волокон. с) Обережно висічіть жирову тканину та м'язову фасцію з м'язового трансплантата за допомогою препарувальних ножиць.



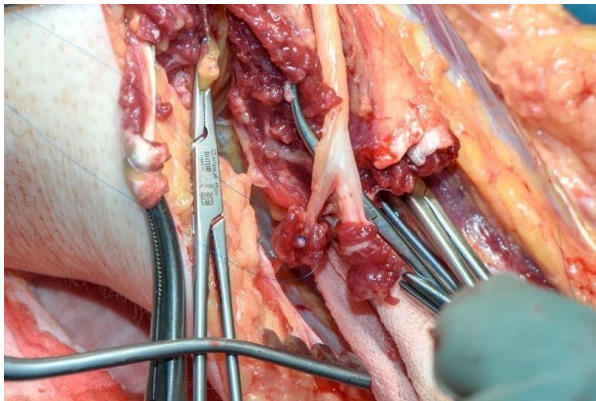
2. Хірургічні методики: RPNI



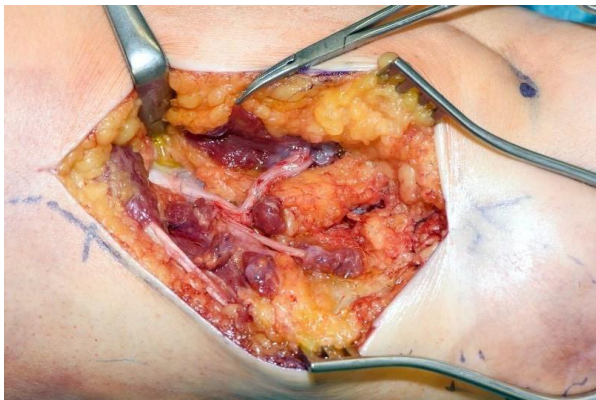
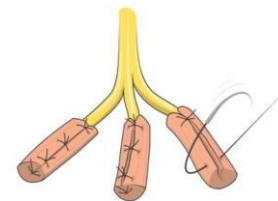
5.-6. Оголіть нерв, вже виділений та розділений на пучки. Розмістіть пучок на м'язовому трансплантаті так, щоб дистальна кукса потрапляла в центральну або проксимальну третину м'язового трансплантата, зберігаючи його орієнтацію паралельно м'язовим волокнам. Зафіксуйте куксу нерва в центрі поздовжньої осі м'язового трансплантата за допомогою 6-0 нерозсмоктувальних монофіламентних швів. Накладіть ще один шов, щоб зафіксувати нерв біля проксимального краю м'язового трансплантата.



2. Хірургічні методики: RPNI



7. Складіть м'язовий трансплантат навколо пучка та зафіксуйте його 6-0 вузловим або безперервним нерозсмоктувальним монофіламентним швом. Повторіть кроки для кожного пучка.



8. Виконайте тупу дисекцію в куксі, щоб створити захищену ділянку, де кожен RPNI може вільно розміщуватися поза опорними поверхнями кінцівки. За можливості зміщуйте розташування кожного RPNI послідовно. Ушийте операційні рани пошарово.

2. Хірургічні методики: RPNI

Нагадування: основні принципи хірургії периферичних нервів

Основні принципи хірургії периферичних нервів включають ретельну дисекцію із застосуванням відповідного збільшення, дбайливе поводження з нервом та його захист.

Для коаптації, будь ласка, підсилюйте шов двома або трьома 8 - 0 нерозсмоктувальними монофіламентними швами (або еквівалентними), які фіксують епіневрій донорського нерва до фасції та епімізію, що оточують реципієнтний нерв. Переконайтеся, що коаптацію виконано без натягу та без надмірної надлишковості.^{7,47-49}

Нервова тканина має лежати вільно та осторонь від опорних поверхонь кінцівки. Це також передбачає корекцію супутніх м'якотканинних і кісткових компонентів для оптимізації результату. Крім того, післяопераційний захист шва нерва протягом трьох тижнів, реабілітація та моніторинг є важливими складовими успішного хірургічного втручання.^{7,47-49}

3. Післяопераційний догляд

Хірургічний післяопераційний догляд

Післяопераційний захист шва нерва протягом періоду тривалістю у три тижні, реабілітація та моніторинг є важливими складовими успішного хірургічного втручання.^{7,47–49}

Протезна реабілітація

- Використання протеза може полегшити зменшення сенсомоторної невідповідності після ампутації завдяки забезпеченню тактильних і зорових стимулів, які підсилюються самим протезом.
- Носіння та використання протеза мають подібний знеболювальний ефект до впливу дзеркальної терапії на реорганізацію сенсомоторної кори та фантомний біль.
- Крім того, носіння протеза сприяє процесу «втілення» тіла та відновлює його цілісність, і обидва ці чинники можуть зменшувати фантомний біль.⁵⁰
- Соматосенсорний зворотний зв'язок посилює втілення, зменшує фантомний біль, і покращує функціональність протеза.^{51–53}

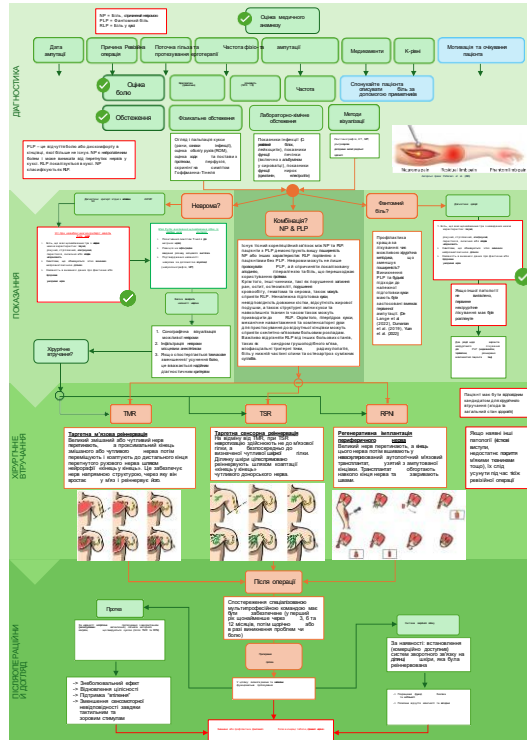
Цей сприятливий ефект, наприклад, може бути досягнутий за допомогою міоелектричних протезів із системами зворотного зв'язку, інтегрованими в гільзу протеза, або без них.³⁸ Окрім зазначених раніше переваг, ці системи зворотного зв'язку забезпечують сенсорний зворотний зв'язок для шкіри, що, як було показано, покращує

функцію, безпеку, мобільність, а також шкірне відчуття агентності та володіння.^{1,34,38,53,54}

Загальна реабілітація

Ретельне тривале динамічне спостереження в мультидисциплінарній команді має вирішальне значення для виявлення та лікування кінцівок зі стійкою симптоматикою, що зрештою призводить до ширшого використання протезів і загального покращення результатів у пацієнтів.¹⁰

3. Післяопераційний догляд



Алгоритм діагностики та лікування фантомного болю

(Авторські права: Jennifer Ernst, Marlene Arlt, MHH)

4. Міркування щодо ампутацій, пов'язаних із бойовими діями

Особливі міркування в бойовій хірургії

Бойова політравма створює унікальні виклики, особливо в контексті поранень, отриманих унаслідок вибухів саморобних вибухових пристроїв. Ці поранення, часто ускладнені проникаючою травмою від вогню зі стрілецької зброї, проявляються характерною картиною ран із широким ушкодженням тканин та втратою кінцівки.⁵⁸ Анатомічне руйнування, спричинене вибуховими або проникаючими пораненнями, може призводити до травми нервової системи та подальшого нейропатичного болю в різних частинах тіла.^{59,60}

У сфері бойової хірургії, час та особливі міркування мають вирішальне значення в прагненні до досягнення оптимальних результатів для постраждалих осіб. Часова чутливість є першочерговою на полі бою, де своєчасна медична допомога може бути визначальним фактором між життям і смертю. Крім того, обмеженість ресурсів, складні умови роботи та необхідність визначення пріоритетності критичних випадків підкреслюють критичну важливість швидкого й ефективного ухвалення рішень під час бойових хірургічних втручань. Медичний персонал має бути добре підготовленим, адаптивним і здатним ухвалювати швидкі та обґрунтовані рішення, щоб максимізувати шанси на виживання й одужання поранених.^{58–60}

4. Міркування щодо ампутацій, пов'язаних із бойовими діями

На полі бою

У контексті бойових умов навчання щодо застосування турнікета має вирішальне значення для запобігання коротким ампутаціям. Турнікет може бути використаний для створення тиску на кінцівку з метою контролю за сильною кровотечею, тим самим запобігаючи подальшому ушкодженню та знижуючи ризик ампутації. Належна підготовка щодо накладання турнікета та обізнаність із правильним часом і технікою його застосування можуть істотно вплинути на результат бойових поранень. Вкрай важливо, щоб особи, залучені до бойових ситуацій, добре володіли навичками застосування турнікета в межах своєї медичної підготовки для ефективного реагування на життєзагрозливі ситуації та для мінімізації ризику коротких ампутацій.^{61–63}

Ведення післятравматичних ампутацій має віддавати пріоритет відкритим методикам зі збереження довжини задля збереження довжини кукси та життєздатних тканин. Рекомендовано використання атипових клаптів для збереження цінної довжини кукси та

функціональних рівнів суглобів. Зберігайте життєздатні структури та нерви якомога довгими, щоб упровадити хірургічні досягнення (TMR, RPNI) при первинній ампутації. Гільйотинні ампутації призводять до втрати довжини кукси та життєздатних тканин.¹⁰

Тривале динамічне спостереження та потенційна ревізійна операція при стійко симптомних кінцівках можуть істотно покращити використання протеза, функцію та якість життя. Крім того, лікування супутнього ПТСР та психологічних розладів у межах мультидисциплінарного підходу є необхідним для максимізації результатів. Подальші досягнення, такі як остеointegraція, виявилися життєздатним варіантом для пацієнтів, які відмовилися від носіння протеза через високу частоту виникнення коротких кукс при ампутаціях, пов'язаних із бойовими діями. TMR довела ефективність у покращенні інтуїтивної функції протезів верхніх кінцівок, а TMR та RPNI є корисними для запобігання виникненню або лікування симптомних невром.^{10,64}

4. Міркування щодо ампутацій, пов'язаних із бойовими діями

На полі бою

Енергія, пов'язана з травматичними пораненнями, часто призводить до значних м'якотканинних дефектів, вищих рівнів ампутації та посиленого болю після ампутації. Таргетна м'язова реіннервація (TMR) у поєднанні з досягненнями протезних технологій та поточними військовими дослідженнями забезпечує кращі результати, допомагаючи військовослужбовцям на дійсній службі та іншим (молодим) особам з ампутацією внаслідок бойових дій в досягненні їхніх цілей.

Військова реабілітація

Більшість військового контингенту на момент поранення становлять молоді, здорові, фізично підготовлені чоловіки, які працюють у специфічному психосоціальному середовищі.⁵⁵ Ветерани збройних сил є унікальною популяцією з унікальними потребами охорони здоров'я та самобутньою культурою, що охоплює певні цінності, етос, кодекси поведінки та підпорядкування авторитету.⁵⁶ Крім того, порівняно із загальною популяцією, у них виявлено частіше вживання опіоїдних препаратів та вищий ризик передозування.

Можливості та сфери застосування TMR й інших досягнень стрімко розширюються завдяки високому рівню успішності операцій, технологічним інноваціям у протезуванні та сприятливим результатам у пацієнтів. Оскільки технології продовжують розвиватися, охоплюючи методи остеоінтеграції та двоспрямовані нейропротезні пристрої, майбутнє хірургії ампутації є надзвичайно перспективним, пропонуючи інноваційні рішення для оптимізації результатів у пацієнтів.^{10,64}

MSQ

Список літератури

1. Lorbeer L, Schiessler J, Eberhardt M, Pardo Jr LA, Sehmisch S, Ernst J. Phantomschmerzen: gegenwärtige Behandlungsstrategien. Orthopädie und Unfallchirurgie up2date. 2024;19(03):249-269. doi:10.1055/a-2177-7974
2. Poppler LH, Parikh RP, Bichanich MJ, et al. Surgical interventions for the treatment of painful neuroma: a comparative meta-analysis. Pain. 2018;159(2):214-223. doi:10.1097/j.pain.0000000000001101
3. Eberlin KR, Ducic I. Surgical Algorithm for Neuroma Management: A Changing Treatment Paradigm. Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open. 2018;6(10):e1952. doi:10.1097/GOX.0000000000001952
4. S3-Leitlinie. Versorgung Peripherer Nervenverletzungen - Version 1.0 AWMF-Register Nr. 005/010 (Stand: 06/2013). <https://www.yumpu.com/de/document/read/20635821/versorgung-peripherer-nervenverletzungen-awmf>
5. Flor H. Phantom-limb pain: characteristics, causes, and treatment. The Lancet Neurology. 2002;1(3):182-189. doi:10.1016/S1474-4422(02)00074-1
6. Dumanian GA, Potter BK, Mioton LM, et al. Targeted Muscle Reinnervation Treats Neuroma and Phantom Pain in Major Limb Amputees: A Randomized Clinical Trial. Annals of Surgery. 2019;270(2):238-246. doi:10.1097/SLA.0000000000003088
7. Dellon AL, Mackinnon SE. Treatment of the Painful Neuroma by Neuroma Resection and Muscle Implantation: Plastic and Reconstructive Surgery. 1986;77(3):427-436. doi:10.1097/00006534-198603000-00016
8. Mauch JT, Kao DS, Friedly JL, Liu Y. Targeted muscle reinnervation and regenerative peripheral nerve interfaces for pain prophylaxis and treatment: A systematic review. PM&R. 2023;15(11):1457-1465. doi:10.1002/pmrj.12972
9. De Lange JWD, Hundepool CA, Power DM, Rajaratnam V, Duraku LS, Zuidam JM. Prevention is better than cure: Surgical methods for neuropathic pain prevention following amputation – A systematic review. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery. 2022;75(3):948-959. doi:10.1016/j.bjps.2021.11.076
10. Tintle SM, LeBrun C, Ficke JR, Potter BK. What Is New in Trauma-Related Amputations. Journal of Orthopaedic Trauma. 2016;30(3):S16-S20. doi:10.1097/BOT.0000000000000668
11. Ephraim PL, Wegener ST, MacKenzie EJ, Dillingham TR, Pezzin LE. Phantom Pain, Residual Limb Pain, and Back Pain in Amputees: Results of a National Survey. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2005;86(10):1910-1919. doi:10.1016/j.apmr.2005.03.031
12. Pettersen E, Sassu P, Reinholdt C, et al. Surgical treatments for postamputation pain: study protocol for an international, double-blind, randomised controlled trial. Trials. 2023;24(1):304. doi:10.1186/s13063-023-07286-0
13. Brushart TM. Nerve Repair: The Scientific Basis. Oxford University Press; 2011.
14. Lee SK, Wolfe SW. Peripheral Nerve Injury and Repair. JAAOS - Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. 2000;8(4). https://journals.lww.com/jaas/fulltext/2000/07000/peripheral_nerve_injury_and_repair.5.aspx
15. Wall PD, Gutnick M. Properties of afferent nerve impulses originating from a neuroma. Nature. 1974;248(5451):740-743. doi:10.1038/248740a0
16. Meyer RA, Raja SN, Campbell JN, Mackinnon SE, Dellon AL. Neural activity originating from a neuroma in the baboon. Brain Research. 1985;325(1-2):255-260. doi:10.1016/0006-8993(85)90321-X
17. Gstoettner C, Laengle G, Salminger S, Festin C, Platzgummer H, Aszmann OC. Der chirurgische Umgang mit peripheren Nerven nach Extremitätenverlust. Orthopäde. 2021;50(1):14-23. doi:10.1007/s00132-020-04032-1
18. S3-Leitlinie. Versorgung Peripherer Nervenverletzungen - Prophylaxe Und Behandlung von Neuromen Und Des Neuropathischen Schmerzes Version 2.0 AWMF-Register Nr. 005/010 (Stand: 09/2023). <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/005-010>
19. Hanyu-Deutmeyer AA, Cascella M, Varacallo M. Phantom Limb Pain. In: StatPearls. StatPearls Publishing; 2024. Accessed July 4, 2024. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448188/>
20. Flor H, Nikolajsen L, Staehelin Jensen T. Phantom limb pain: a case of maladaptive CNS plasticity? Nat Rev Neurosci. 2006;7(11):873-881. doi:10.1038/nrn1991
21. Tham JL, Sood A, Saffari T, Khajuria A. The effect of targeted muscle reinnervation on post-amputation pain and functional outcomes: a systematic review and meta-analysis. European Journal of Plastic Surgery. 2022;46:1-23. doi:10.1007/s00238-022-02021-5
22. Kuiken TA, Barlow AK, Hargrove LJ, Dumanian GA. Targeted Muscle Reinnervation for the Upper and Lower Extremity. Techniques in Orthopaedics. 2017;32(2):109-116. doi:10.1097/BTO.0000000000000194
23. Dellon AL, Aszmann OC. In musculus, veritas? Nerve “in muscle” versus targeted muscle reinnervation versus regenerative peripheral nerve interface: Historical review. Microsurgery. 2020;40(4):516-522. doi:10.1002/micr.30575
24. Scott BB, Winograd JM, Redmond RW. Surgical Approaches for Prevention of Neuroma at Time of Peripheral Nerve Injury. Front Surg. 2022;9:819608. doi:10.3389/fsurg.2022.819608
25. Valerio IL, Dumanian GA, Jordan SW, et al. Preemptive Treatment of Phantom and Residual Limb Pain with Targeted Muscle Reinnervation at the Time of Major Limb Amputation. Journal of the American College of Surgeons. 2019;228(3):217-226. doi:10.1016/j.jamcollsurg.2018.12.015

Список літератури

25. Valerio IL, Dumanian GA, Jordan SW, et al. Preemptive Treatment of Phantom and Residual Limb Pain with Targeted Muscle Reinnervation at the Time of Major Limb Amputation. *Journal of the American College of Surgeons*. 2019;228(3):217-226. doi:10.1016/j.jamcollsurg.2018.12.015
26. Serino A, Akselrod M, Salomon R, et al. Upper limb cortical maps in amputees with targeted muscle and sensory reinnervation. *Brain*. 2017;140(11):2993-3011. doi:10.1093/brain/awx242
27. Kuiken TA. Targeted Muscle Reinnervation for Real-time Myoelectric Control of Multifunction Artificial Arms. *JAMA*. 2009;301(6):619. doi:10.1001/jama.2009.116
28. Souza JM, Fey NP, Cheesborough JE, Agnew SP, Hargrove LJ, Dumanian GA. Advances in Transfemoral Amputee Rehabilitation: Early Experience with Targeted Muscle Reinnervation. *Curr Surg Rep*. 2014;2(5):51. doi:10.1007/s40137-014-0051-4
29. Ives GC, Kung TA, Nghiem BT, et al. Current State of the Surgical Treatment of Terminal Neuromas. *NEUROSURGERY*. 2018;83(3):354-364. doi:10.1093/neuros/nyx500
30. Mioton LM, Dumanian GA. Targeted muscle reinnervation and prosthetic rehabilitation after limb loss. *J Surg Oncol*. 2018;118(5):807-814.
31. Pet MA, Ko JH, Friedly JL, Mourad PD, Smith DG. Does Targeted Nerve Implantation Reduce Neuroma Pain in Amputees? *Clinical Orthopaedics & Related Research*. 2014;472(10):2991-3001. doi:10.1007/s11999-014-3602-1
32. Pettersen E, Sassu P, Pedrini FA, et al. Targeted Muscle Reinnervation: Surgical Protocol for a Randomized Controlled Trial in Postamputation Pain. *JoVE*. 2024;(205):66379. doi:10.3791/66379
25. Valerio IL, Dumanian GA, Jordan SW, et al. Preemptive Treatment of Phantom and Residual Limb Pain with Targeted Muscle Reinnervation at the Time of Major Limb Amputation. *Journal of the American College of Surgeons*. 2019;228(3):217-226. doi:10.1016/j.jamcollsurg.2018.12.015
26. Serino A, Akselrod M, Salomon R, et al. Upper limb cortical maps in amputees with targeted muscle and sensory reinnervation. *Brain*. 2017;140(11):2993-3011. doi:10.1093/brain/awx242
27. Kuiken TA. Targeted Muscle Reinnervation for Real-time Myoelectric Control of Multifunction Artificial Arms. *JAMA*. 2009;301(6):619. doi:10.1001/jama.2009.116
28. Souza JM, Fey NP, Cheesborough JE, Agnew SP, Hargrove LJ, Dumanian GA. Advances in Transfemoral Amputee Rehabilitation: Early Experience with Targeted Muscle Reinnervation. *Curr Surg Rep*. 2014;2(5):51. doi:10.1007/s40137-014-0051-4
29. Ives GC, Kung TA, Nghiem BT, et al. Current State of the Surgical Treatment of Terminal Neuromas. *NEUROSURGERY*. 2018;83(3):354-364. doi:10.1093/neuros/nyx500
30. Mioton LM, Dumanian GA. Targeted muscle reinnervation and prosthetic rehabilitation after limb loss. *J Surg Oncol*. 2018;118(5):807-814.
31. Pet MA, Ko JH, Friedly JL, Mourad PD, Smith DG. Does Targeted Nerve Implantation Reduce Neuroma Pain in Amputees? *Clinical Orthopaedics & Related Research*. 2014;472(10):2991-3001. doi:10.1007/s11999-014-3602-1
32. Pettersen E, Sassu P, Pedrini FA, et al. Targeted Muscle Reinnervation: Surgical Protocol for a Randomized Controlled Trial in Postamputation Pain. *JoVE*. 2024;(205):66379. doi:10.3791/66379
33. Felder JM, Pripotnev S, Ducic I, Skladman R, Ha AY, Pet MA. Failed Targeted Muscle Reinnervation: Findings at Revision Surgery and Concepts for Success. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*. 2022;10(4):e4229. doi:10.1097/GOX.0000000000004229
34. Markovic M, Schweisfurth MA, Engels LF, et al. The clinical relevance of advanced artificial feedback in the control of a multi-functional myoelectric prosthesis. *J NeuroEngineering Rehabil*. 2018;15(1):28. doi:10.1186/s12984-018-0371-1
35. Sensinger JW, Dosen S. A Review of Sensory Feedback in Upper-Limb Prostheses From the Perspective of Human Motor Control. *Front Neurosci*. 2020;14:345. doi:10.3389/fnins.2020.00345
36. Raspopovic S, Valle G, Petrini FM. Sensory feedback for limb prostheses in amputees. *Nat Mater*. 2021;20(7):925-939. doi:10.1038/s41563-021-00966-9
37. Gadgetto A, Baur EM, Prahm C, et al. Reduction of Phantom Limb Pain and Improved Proprioception through a TSR-Based Surgical Technique: A Case Series of Four Patients with Lower Limb Amputation. *JCM*. 2021;10(17):4029. doi:10.3390/jcm10174029
38. Bernhart S, Kranzinger S, Berger A, Peternell G. Ground Contact Time Estimating Wearable Sensor to Measure Spatio-Temporal Aspects of Gait. *Sensors*. 2022;22(9):3132. doi:10.3390/s22093132
39. Hebert JS, Olson JL, Morhart MJ, et al. Novel Targeted Sensory Reinnervation Technique to Restore Functional Hand Sensation After Transhumeral Amputation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2014;22(4):765-773. doi:10.1109/TNSRE.2013.2294907
40. Kuiken TA, Miller LA, Lipschutz RD, et al. Targeted reinnervation for enhanced prosthetic arm function in a woman with a proximal amputation: a case study. *The Lancet*. 2007;369(9559):371-380. doi:10.1016/S0140-6736(07)60193-7

Список літератури

41. Hebert JS, Elzinga K, Chan KM, Olson J, Morhart M. Updates in Targeted Sensory Reinnervation for Upper Limb Amputation. *Curr Surg Rep*. 2014;2(3):45. doi:10.1007/s40137-013-0045-7
42. Woo SL, Kung TA, Brown DL, Leonard JA, Kelly BM, Cederna PS. Regenerative Peripheral Nerve Interfaces for the Treatment of Postamputation Neuroma Pain: A Pilot Study. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*. 2016;4(12):e1038. doi:10.1097/GOX.0000000000001038
43. Kung TA, Langhals NB, Martin DC, Johnson PJ, Cederna PS, Urbanchek MG. Regenerative Peripheral Nerve Interface Viability and Signal Transduction with an Implanted Electrode. *Plastic & Reconstructive Surgery*. 2014;133(6):1380-1394. doi:10.1097/PRS.0000000000000168
44. Kubiak CA, Kemp SWP, Cederna PS. Regenerative Peripheral Nerve Interface for Management of Postamputation Neuroma. *JAMA Surg*. 2018;153(7):681. doi:10.1001/jamasurg.2018.0864
45. Pettersen E, Sassu P, Pedrini FA, et al. Regenerative Peripheral Nerve Interface: Surgical Protocol for a Randomized Controlled Trial in Postamputation Pain. *JoVE*. 2024;(205):66378. doi:10.3791/66378
46. Isbester KA, Ferrin P, Krakauer KN, Peters BR. Primary Regenerative Peripheral Nerve Interfaces Using Devascularized Vastus Lateralis Muscle in Sensate Anterolateral Thigh Flap Donor Sites. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*. 2023;11(9):e5241. doi:10.1097/GOX.0000000000005241
47. Krishnan KG, Pinzer T, Schackert G. Coverage of Painful Peripheral Nerve Neuromas with Vascularized Soft Tissue: Method and Results. *Operative Neurosurgery*. 2005;56(suppl_4):ONS-369-ONS-378. doi:10.1227/01.NEU.0000156881.10388.D8
48. Mackinnon SE, Dellon AL, Hudson AR, Hunter DA. Alteration of Neuroma Formation by Manipulation of Its Microenvironment: *Plastic and Reconstructive Surgery*. 1985;76(3):345-352. doi:10.1097/00006534-198509000-00001
49. Yan H, Gao W, Pan Z, Zhang F, Fan C. The Expression of α -SMA in the Painful Traumatic Neuroma: Potential Role in the Pathobiology of Neuropathic Pain. *Journal of Neurotrauma*. 2012;29(18):2791-2797. doi:10.1089/neu.2012.2502
50. Erlenwein J, Diers M, Ernst J, Schulz F, Petzke F. Clinical updates on phantom limb pain. *PR9*. 2021;6(1):e888. doi:10.1097/PR9.0000000000000888
51. Dietrich C, Nehrdich S, Seifert S, et al. Leg Prosthesis With Somatosensory Feedback Reduces Phantom Limb Pain and Increases Functionality. *Front Neurol*. 2018;9:270. doi:10.3389/fneur.2018.00270
52. Rognini G, Petrini FM, Raspopovic S, et al. Multisensory bionic limb to achieve prosthesis embodiment and reduce distorted phantom limb perceptions. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2019;90(7):833-836. doi:10.1136/jnnp-2018-318570
53. Schweisfurth MA, Markovic M, Dosen S, Teich F, Graimann B, Farina D. Electrotactile EMG feedback improves the control of prosthesis grasping force. *J Neural Eng*. 2016;13(5):056010. doi:10.1088/1741-2560/13/5/056010
54. Petrini FM, Bumbasirevic M, Valle G, et al. Sensory feedback restoration in leg amputees improves walking speed, metabolic cost and phantom pain. *Nat Med*. 2019;25(9):1356-1363. doi:10.1038/s41591-019-0567-3
55. Defence Statistics: Ministry of Defence. UK armed forces biannual diversity statistics. Whitehall: Analysis (Tri-Service). Published online 2022.
56. Olenick M, Flowers M, Diaz V. US veterans and their unique issues: enhancing health care professional awareness. *AMEP*. Published online December 2015:635. doi:10.2147/AMEP.S89479
57. Toblin RL, Quartana PJ, Riviere LA, Walper KC, Hogue CW. Chronic Pain and Opioid Use in US Soldiers After Combat Deployment. *JAMA Intern Med*. 2014;174(8):1400. doi:10.1001/jamainternmed.2014.2726
58. Smith S, Devine M, Taddeo J, McAlister VC. Injury profile suffered by targets of antipersonnel improvised explosive devices: prospective cohort study. *BMJ Open*. 2017;7(7):e014697. doi:10.1136/bmjopen-2016-014697
59. Eckhoff MD, Craft MR, Nicholson TC, Nesti LJ, Dunn JC. Lower Extremity Combat Sustained Peripheral Nerve Injury in US Military Personnel. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*. 2021;9(3):e3447. doi:10.1097/GOX.0000000000003447
60. Mercer S, Chavan S, Tong J, Connor D, De Mello W. The Early Detection and Management of Neuropathic Pain Following Combat Injury. *J R Army Med Corps*. 2009;155(2):94-98. doi:10.1136/jramc-155-02-03
61. Navein J, Coupland R, Dunn R. The Tourniquet Controversy. *Journal of Trauma: Injury, Infection & Critical Care*. 2003;54(5):S219-S220. doi:10.1097/01.TA.0000047202.16935.E9
62. Spreadborough PJ, Strong AL, Mares J, Levi B, Davis TA. Tourniquet use following blast-associated complex lower limb injury and traumatic amputation promotes end organ dysfunction and amplified heterotopic ossification formation. *J Orthop Surg Res*. 2022;17(1):422. doi:10.1186/s13018-022-03321-z
63. Deloughry JL, Griffiths R. Arterial tourniquets. *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain*. 2009;9(2):56-60. doi:10.1093/bjaceaccp/mkp002
64. Rask DMG, Adams MH, Liverneaux P, et al. Targeted muscle reinnervation in upper extremity amputation in military hand surgery: A systematic review. *Hand Surgery and Rehabilitation*. 2023;42(5):392-399. doi:10.1016/j.hansur.2023.07.006
65. Kalil, K., Li, L., & Hutchins, B.I. Signaling Mechanisms in Cortical Axon Growth, Guidance, and Branching. *Frontiers in Neuroanatomy* 5 (2011)
66. Shankar Hariharan et al. "Ultrasound-Guided Neuroma Injection" Aug 6, 2019,

Фінансування та подяки

Проект PAMELA отримує фінансову підтримку від **Else Kröner-Fresenius Foundation** (номер гранту 2023_EKHA.107).

Докладніше: див. повну настанову