

Terapeutický potenciál transkutánní míšní stimulace u jedinců s míšní lézí

Therapeutic potential of transcutaneous spinal cord stimulation in individuals with spinal cord injury

J. Kříž¹, V. Rybka², K. Šedivá¹, J. Balková¹, J. Demeková²

¹ Spinální jednotka při Klinice rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol a Homolka, Praha

² Klinika rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol a Homolka, Praha

Souhrn: Úvod: Transkutánní míšní stimulace (tSCS – transcutaneous spinal cord stimulation) je neinvazivní metoda neuromodulace, která nabízí nový přístup k rehabilitaci osob s míšní lézí. Jejím cílem je zvýšení excitability spinálních okruhů a facilitace reziduálních neuronálních spojení, která zůstávají i po poškození míchy zachovaná, avšak nefunkční. **Metody:** Přehledový článek shrnuje dostupné poznatky o využití tSCS v oblasti motorických, autonomních a respiračních funkcí a o jejím vlivu na spasticitu a posturální stabilitu. Čerpá z aktuálně dostupné odborné literatury, vč. randomizovaných kontrolovaných studií, kazuistik a pilotních intervencí zaměřených na účinek tSCS u jedinců s různou úrovní a různým rozsahem míšní léze. Práce byly hodnoceny z hlediska mechanismů účinku, technických parametrů stimulace a dosažených klinických efektů.

Výsledky: Studie prokázaly vliv tSCS na zvýšení excitability míšních neuronálních sítí a usnadnění aktivace dříve nefunkčních motorických drah. Bylo zaznamenáno zlepšení volní motoriky horních i dolních končetin, zvýšení svalové síly, lepší kontrola trupu v sedu a pozitivní efekt na respirační parametry vč. síly dechových svalů. Kromě toho bylo pozorováno zlepšení autonomních funkcí, zejména mikce, defekace a řízení krevního tlaku, a zmírnění spasticity. Účinky byly zaznamenány i v chronické fázi poranění a v některých případech přetrvávaly i po ukončení stimulace, což naznačuje potenciál pro dlouhodobou neuroplasticitu. **Závěr:** tSCS představuje perspektivní, bezpečnou a dobře dostupnou metodu, která může rozšířit terapeutické možnosti v neurorehabilitaci osob s míšní lézí. Další výzkum by měl směřovat k optimalizaci stimulačních protokolů a integraci s jinými rehabilitačními intervencemi.

Klíčová slova: poranění míchy – neurorehabilitace – transkutánní míšní stimulace – senzomotorické funkce – autonomní funkce – spasticita

Summary: Introduction: Transcutaneous spinal cord stimulation (tSCS) is a non-invasive neuromodulation technique that provides a novel approach to the rehabilitation of individuals with spinal cord injury (SCI). Its goal is to increase the excitability of spinal circuits and facilitate residual neuronal connections that remain preserved, but are dysfunctional after SCI. **Methods:** This review summarizes the current knowledge on the use of tSCS in motor, autonomic, and respiratory functions, as well as its effects on spasticity and postural stability. It draws from available scientific literature, including randomized controlled trials, case reports, and pilot studies focused on the impact of tSCS in individuals with different levels and severities of SCI. The studies were evaluated based on their mechanisms of action, technical stimulation parameters, and the clinical outcomes achieved. **Results:** Studies have demonstrated that tSCS increases the excitability of spinal neuronal networks, promoting the activation of previously dysfunctional motor pathways. Notable improvements include enhanced voluntary movement in the upper and lower limbs, increased muscle strength, improved trunk control while sitting, and positive effects on respiratory parameters such as respiratory muscle strength. Additionally, enhancements in autonomic functions – particularly micturition, defecation, and blood pressure regulation – along with reduced spasticity, have been observed. These effects were also evident in the chronic phase of injury, and in some cases, persisted after stopping stimulation, indicating the potential for long-term neuroplasticity. **Conclusion:** tSCS is a promising, safe, and easily accessible method that could expand treatment options in neurorehabilitation for individuals with SCI. Future research should focus on optimizing stimulation protocols and combining them with other rehabilitation methods.

Key words: spinal cord injury – neurorehabilitation – transcutaneous spinal cord stimulation – sensorimotor function – autonomic function – spasticity

Úvod

Poranění míchy je závažná zdravotní komplikace s negativními důsledky pro senzomotorické i autonomní funkce postižených jedinců. Přestože jsou standardní rehabilitační přístupy základem terapie, mají pouze omezené možnosti ovlivnění samotného neurologického deficitu. V posledním desetiletí se začala rozvíjet transkutánní stimulace míchy (tSCS – transcutaneous spinal cord stimulation). Jedná se o neinvazivní metodu neuromodulace, která může potenciálně zvýšit účinnost běžné rehabilitace a přinést nové terapeutické možnosti pro pacienty s kompletní i nekompletní míšní lézí.

Transkutánní míšní stimulace využívá povrchově umístěné elektrody, které pomocí elektrických impulzů cílí na zadní míšní kořeny a další struktury v oblasti páteře [1]. Tento přístup je inspirován principy epidurální stimulace (eSCS), avšak na rozdíl od ní nevyžaduje chirurgický výkon, čímž se minimalizuje riziko infekce a odpadá potřeba rekonvalescence. Jedním z klíčových konceptů, který je v souvislosti s účinkem tSCS uváděn, je existence „spících“ nebo subfunkčních nervových spojení v místě léze. Ve většině případů, kdy je míšní léze klinicky hodnocena jako kompletní, lze i přesto detekovat zachovalá nervová vlákna, která zůstávají v místě poranění neporušená, ale nejsou schopná generovat klinicky pozorovatelný nebo funkční pohyb [2]. Právě tSCS je nástrojem, který dokáže snížit aktivační práh těchto vláken a usnadnit reorganizaci spinálních sítí, čímž podporuje vznik funkčně významných motorických odpovědí [3]. V kombinaci s aktivními rehabilitačními přístupy může transkutánní stimulace míchy vést k výrazně lepším motorickým výsledkům než fyzioterapie samotná. Aktuální výzkum proto stále více směřuje k integraci tSCS do standardních léčebných protokolů pro pacienty s míšní lézí. Vzhledem k její bezpečnosti, relativně nízké nákladovosti a jednoduché

aplikaci má tato metoda potenciál stát se široce dostupnou součástí moderní neurorehabilitace.

Cílem tohoto článku je shrnout dosažené poznatky o vlivu tSCS na senzomotorické a autonomní funkce pacientů s míšní lézí, posoudit její mechanismy účinku a diskutovat možnosti jejího klinického využití v rehabilitační praxi.

Princip metody

Základním principem tSCS je aplikace elektrických impulzů pomocí povrchových elektrod, které stimulují především aferentní vlákna zadních kořenů (zejména silná la vlákna). Vstup těchto aferentních signálů do míšních okruhů zvyšuje jejich excitabilitu [4]. Zvýšená excitabilita neuronálních sítí zvyšuje schopnost reakce na zbytkové, často nevyužívané nebo „spící“ sestupné dráhy z mozkové kůry. Transkutánní stimulace tedy podporuje aktivaci motorických neuronů, které byly do té doby funkčně nevyužívané v důsledku omezeného excitačního vstupu po poškození sestupných drah. Ačkoliv nejsou tyto motorické jednotky aktivovány přímo, stimulace zvýší jejich membránový potenciál, takže i diskretní supraspinální vstup může vyvolat motorickou odpověď [3].

Zásadní roli ve funkci tSCS hrají neuronální sítě, jako jsou centrální generátory pohybových vzorů (CPG – central pattern generators) a propriospinální systém (PSS). CPG jsou schopné autonomně generovat rytmickou motorickou aktivitu, jako je chůze, i bez přímého supraspinálního vlivu [5]. PSS představuje neuronální spojení mezi segmenty míchy a umožňuje koordinaci mezi různými částmi těla [6]. Tento systém může zprostředkovat přenos aferentní informace mezi krční a lumbosakrální míchou, čímž se vysvětluje např. zlepšení funkce dolních končetin po aplikaci cervikální tSCS [7].

Z neurofyzilogického hlediska tSCS vyvolává tzv. zadní kořenové reflexy (PRR – posterior root-muscle reflexes),

kteří připomínají monosynaptické reflexy typu H-reflexu, ale s multisegmentálním a polysynaptickým zapojením [4]. Tyto reflexy je možné studovat pomocí elektromyografie, přičemž různé svalové skupiny vykazují odlišné odpovědi v závislosti na typu aferentní stimulace – monosynaptická v extenzorech a polysynaptická ve flexorech [8]. Důležitou součástí rehabilitačního efektu tSCS je opakovaná aktivace neuronálních sítí, která podporuje plasticitu – jak morfológickou, tak synaptickou. Tato plasticita je zásadní pro obnovu funkčních spojení a trvalejší změny v motorickém výstupu. Stimulací se aktivují časné genové expresní dráhy spojené s neuroplasticitou, které umožňují reorganizaci neuronálních sítí vč. integrace senzoric- kých zpětných vazeb [9].

Parametry stimulace a technické aspekty Umístění elektrod

Ve většině studií zaměřených na tSCS k ovlivnění motorických funkcí dolních končetin byla stimulační elektroda umístěna v oblasti mezi trnovými výběžky obratlů T11–T12 (tab. 1). Tato lokalizace odpovídá míšnímu segmentu L1–L2, kde je popisován výskyt interneuronů tvořících CPG. Některé studie rozšířily stimulační zónu na sousední segmenty [37]. Stimulace k ovlivnění motorických funkcí horních končetin byla aplikována v oblasti krční páteře mezi trnovými výběžky C3–C4 a C5–C6 [24].

Katodové elektrody byly obvykle umístěny ve dvojici horizontálně po stranách páteře nebo vertikálně nad a pod stimulovaným segmentem. Anodové elektrody byly fixovány bilaterálně nad hřebeny kyčelních kostí, na dolní části břicha nebo v případě stimulace krčních segmentů také na přední stranu krku [37].

Aplikace může být unipolární nebo multipolární. Přesnější aktivace cílových motorických skupin bývá častěji dosažena při cílené unipolární

stimulaci. Multipolární stimulace může být výhodná pro generování komplexních motorických vzorů, ale někdy může vést k nekonzistentní aktivaci antagonistických svalů a snížení síly v důsledku rekurentní inhibice [38].

Stimulační parametry

Většina studií využívala ke stimulaci obdélníkové impulzy. Podle typů přístrojů byly zvoleny monofázické (např. Rehamove 3.0, Hasomed GmbH, Germany) nebo bifázické impulzy (např. ARCEX, ONWARD Medical, Netherlands). Šířka impulzů se pohybovala mezi 0,5 a 2,0 ms, nejčastěji byla 1 ms.

Základní stimulační frekvence byla nejčastěji 30 Hz, ale vyskytly se i protokoly využívající frekvence od 5 do 90 Hz v závislosti na terapeutickém cíli [39]. Pro stimulaci extenze dolních končetin byla využívána frekvence 15 Hz, zatímco pro facilitaci rytmických chůzových pohybů byla zvolena frekvence 30 Hz [40]. Vyšší frekvence (50 Hz) byla využita k ovlivnění spasticity [29]. Základní frekvence byla často aplikována s nosnou frekvencí 10 kHz. Tento nosný středofrekvenční proud umožnil bezbolestné použití vyšší intenzity stimulačního nízkofrekvenčně modulovaného proudu díky snížení kožního odporu [7].

Intenzita proudu se pohybovala v rozmezí 10–250 mA v režimu constant current nebo 18–28 V v režimu constant voltage. Výpočetní modely ukazují, že intenzita potřebná k depolarizaci aferentních vláken dorzálních kořenů v zóně vstupu do dorzálních kořenů by měla být $\geq 17,6$ V (8,8–35,2 mA při průměru elektrody 3 cm), protože se odhaduje, že množství proudu, které proniká touto oblastí skrz meziobratlové tkáně, je pouze 9 % [41]. Ve studiích tSCS byla intenzita nastavena podle vyvolání parestézií, tolerance účastníka a podprahové úrovně, tedy bez viditelné svalové kontrakce. Tím umožnila dlouhodobou neuromodulaci bez svalové únavy a nepřetržité působení na neuronální síť během motorického tréninku.

Vliv stimulace na funkci dolních končetin

Obnovení lokomoční funkce dolních končetin jedinců po poranění míchy je jedním z předních výzkumných směrů v této oblasti, neboť je spojený s maximálně viditelným pozitivním efektem, a má tudíž obecně v odborné i laické veřejnosti největší ohlas. Proto po úspěšných preklinických studiích míšní stimulace u nižších obratlovců a navazujících klinických studiích s epidurální míšní stimulací byla upřena pozornost k tSCS. Jednou z prvních studií zaznamenávajících vliv tSCS na zlepšení motoriky je práce autorů Hofstoetter et al. [10], kteří prezentovali případ mladé ženy s chronickou motoricky nekompletní míšní lézí v úrovni T9 (tab. 2). Při podprahové tSCS došlo u této pacientky k okamžitému významnému zlepšení motorické aktivity dolních končetin a chůze. Autoři předpokládali, že kontinuální tSCS zvýšila fyziologický stav bederních lokomočních okruhů, které se následně staly citlivějšími na supraspinální vlivy prostřednictvím reziduálních sestupných drah. Tyto výsledky potvrdili v další studii, do které navíc zařadili další dva subjekty s nekompletní míšní lézí [11].

Autoři Gerasimenko et al. [42] provedli nejdříve studii na 6 zdravých dobrovolnících, u kterých sledovali vliv tSCS na mimovolní pohyb dolních končetin v antigravitační poloze. Stimulace v úrovni T1 vyvolala krokové pohyby a přidáním stimulace v úrovni C5 se motorická odpověď zvýraznila a více zkoordinovala. Posílení motorického výstupu během krční stimulace připisují aktivaci dlouhého propriospinálního systému. Do další studie zahrnuli 5 jedinců s chronickou kompletní míšní lézí v úrovni mezi C5 a T4. Již při první aplikaci tSCS se podařilo vyvolat lokomoční pohyby bez volního úsilí. Navíc došlo v průběhu 4 týdnů k obnovení volní facilitace pohybů během stimulace, a to u všech subjektů. S použitím tSCS se tedy podařilo transformovat neuronální síť z dormantního do funkčního stavu

v rozsahu potřebném k obnovení volního pohybu [12].

Následující studie se věnovaly kombinaci tréninku chůze a tSCS u chronických pacientů. Autoři McHugh et al. [13] zařadili do studie 10 pacientů (AIS (ASIA Impairment Scale) C–D). Cvičební jednotka sestávala z 30 min nácviku chůze s tSCS a 90 min samostatného lokomočního tréninku 3× týdně po dobu 8 týdnů. Výsledky ukázaly signifikantní zlepšení ve všech měřených parametrech chůze (10m test chůze – 10MWT, 6min test chůze – 6MWT, walking index for spinal cord injury – WISCI II, timed up and go – TUG test). K obdobným pozitivním výsledkům došli i autoři Semejina et al. [14], kteří hodnotili efekt tSCS u dvou jedinců (AIS D). Po čtyřměsíční intervenci zaznamenali zlepšení v 6MWT a rovněž ve stabilitě s použitím nástrojů WISCI a balanční škály podle Bergové (BBS – Berg balance scale), přičemž efekt přetrvával i po dvou měsících od ukončení stimulace. Tharu et al. [15] podrobili jednoho chronického pacienta s míšní lézí T12 (AIS B) nejdříve 10týdenní intenzivní rehabilitaci (RHB) a poté na 10 týdnů přidali tSCS. Zaznamenali minimální zlepšení po samotné RHB, ale významné zvýšení svalové síly dolních končetin po RHB s tSCS. Zároveň se zlepšila vzdálenost chůze ze 3 na 10 m.

Autoři Al'joboori et al. [16] zkoumali 9 chronických jedinců s AIS A–D při tréninku vstávání ze sedu. Během 8týdenního tréninkového programu byla 5 z nich aplikována tSCS. Ve stimulovalé skupině u 3 pacientů došlo ke zvýšení celkového motorického skóre pro dolní končetiny. U ostatních pacientů se změny neprojevíly. Autoři Kumru et al. [17] hodnotili rozdíly v efektu tSCS aplikovaného na jeden, dva nebo tři segmenty současně u 10 chronických pacientů AIS D. Stimulace probíhala jednorázově bez jiné intervence. Výsledky ukázaly významné zlepšení v chůzovém testu u všech stimulací, ale pouze multisegmentální stimulace

Tab. 1. Parametry stimulace ve studiích zkoumající efekt tSCS u jedinců s míšní lézí.

Tab. 1. Stimulation parameters in studies investigating the effect of tSCS in spinal cord injury individuals.

Elektrody					Stimulační protokol				
Studie	katoda		anoda						
	velikost	umístění	velikost	umístění	popis	frekvence	intenzita	délka stimulace	délka intervence
Ovlivnění funkce dolních končetin									
Hofstoetter et al. [10]*	Ø 5 cm	T11 + T12	8 × 13 cm	dolní břicho	symetrické bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz	18 V	–	–
Hofstoetter et al. [11]	Ø 5 cm	T11–T12	8 × 13 cm	podél pupku	symetrické bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz	18–27 V	–	–
Gerasimenko et al. [12]	Ø 2,5 cm	T11–T12 + Co	5 × 10,2 cm	crista iliaca	monopolární obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz (T11), 5 Hz (Co) + 10 kHz	80–180 mA	3 × 3 min	18 týdnů
McHugh et al. [13]	5 × 10 cm	T11–T12	7,5 × 13 cm	dolní břicho	symetrické bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	50 Hz	20–80 mA	30 min	8 týdnů
Samejina et al. [14]	Ø 2,5 cm	T11–L1 + C3–C7	5 × 10 cm	crista iliaca	bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	5–75 mA	90–120 min	8 týdnů
Tharu et al. [15]*	–	T10–T11	–	T12–L1		30 Hz + 10 kHz	105–130 mA		10 týdnů
Al'jabouri et al. [16]	5 × 5 cm	T10–T11	5 × 5 cm	T12–L1	bifázické impulzy 1 ms	30 Hz	40–110 mA	60 min	8 týdnů
Kumru et al. [17]	Ø 2 cm	C5, L1, Co	5 × 12 cm	crista iliaca	bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	30–75 mA	2 min	–
Shapkova et al. [18]	3 × 4 cm	T12	3 × 4 cm	břicho	monofázické impulzy 0,5 ms	1/3/67 Hz	< 70 mA	41–55 min	2 týdny
Estes et al. [19]	Ø 5 cm	T11–T12	10 × 15 cm	podél pupku	bifázické impulzy	50 Hz	podprahově	30 min	4 týdny
Comino-Suaréz et al. [20]	5 × 9 cm	T11–T12	5 × 9 cm	crista iliaca	symetrické bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz	dle tolerance	30 min	8 týdnů
Ovlivnění funkce horních končetin									
Inanici et al. [21]	Ø 2,5 cm	C3–C4 + C6–C7	5 × 10 cm	crista iliaca	kontinuální bifázické impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	80–120 mA	60 ± 20 min	5 týdnů
Inanici et al. [7]	Ø 2,5 cm	pod úrovní léze	5 × 10 cm	crista iliaca	monofázické a bifázické impulzy	30 Hz + 10 kHz	40–90 mA	120 min	12 týdnů
Freyvert et al. [22]	–	C5	–	SIAS		5–30 Hz	20–100 mA	15–30 min	6 týdnů
Gad et al. [23]	Ø 2 cm	C3–C4 + C6–C7	5 × 10 cm	crista iliaca	kontinuální bifázické nebo monofázické impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	10–250 mA	60–120 min	4 týdny
Tefertiller et al. [24]	Ø 3,2 cm	C3–C4 + C6–C7	7,5 × 13 cm	crista iliaca	monofázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	dle tolerance	60 + 60 min	4–16 týdnů
Moritz et al. [25]	–	nad a pod lézí	–	crista iliaca / clavícula	monofázické a bifázické impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	10–180 mA	60 min	8 týdnů
Ovlivnění stability sedu									
Rath et al. [26]	Ø 3,2 cm	T11–T12 + L1–L2	7,5 × 13 cm	crista iliaca	monofázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz (T11), 10 Hz (L1) + 10 kHz	10–140 mA	90 min	–

Ovlivnění respiračních funkcí									
Gad et al. [27]	–	C3–C4, C5–C6, T1–T2	–	ramena	bifázické impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	podprahově	60 min	2 týdny
Kumru et al. [28]	Ø 2 cm	C3–C4 + T9–T10	5 × 12 cm	crista iliaca	bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	90 % motorického prahu	30 min	1 týden
Ovlivnění spasticity									
Hofstoetter et al. [29]*	Ø 5 cm	T11 + T12	8 × 13 cm	dolní břicho	symetrické bifázické obdélníkové impulzy 1 ms	50 Hz	20 ± 2 V	30 min	–
Ovlivnění autonomních funkcí									
Phillips et al. [30]	Ø 3 cm	T7–T8	5 × 9 cm	crista iliaca	monofázické impulzy 1 ms	30 Hz	10–70 mA	1 min	–
Engel-Haber et al. [31]	Ø 2,5 cm	C3–T2, T11/12, L1/2, S1/2	8 × 13 cm	crista iliaca	monofázické obdélníkové impulzy 1 ms	30 Hz + 5 kHz	5–120 mA	–	–
Sachdeva et al. [32]	Ø 3 cm	T7–T8	5 × 9 cm	crista iliaca	bifázické impulzy 2 ms	30 Hz	20–30 mA	30 + 30 s	–
Solinsky et al. [33]	Ø 3,2 cm	T10–T11	5 × 9 cm	crista iliaca	bifázické impulzy 2 ms	120 Hz, 30 Hz, 30 Hz + 5 kHz	80 % motorického prahu	5 min	–
Gad et al. [34]	Ø 2 cm	T11	5 × 10 cm	crista iliaca	monofázické impulzy 1 ms	30 Hz, 1 Hz	10–200 mA	60–180 s	–
Kreydin et al. [35]	Ø 2 cm	T11 + L1	5 × 10 cm	crista iliaca	bifázické impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	10–200 mA	90 min	8 týdnů
Kreydin et al. [36]	Ø 2 cm	T11 + L1	5 × 10 cm	crista iliaca	bifázické impulzy 1 ms	30 Hz + 10 kHz	80 % motorického prahu	60 min	– / 5 týdnů
* – bez uvedené polarity elektrod, SIAS – spina iliaca anterior superior									

vedla k významnému zvýšení síly m. tibialis anterior. Shapkova et al. [18] hodnotili efekt tSCS v kombinaci s chůzí v exoskeletonu. Studie se zúčastnilo 35 chronických pacientů AIS A–C, přičemž u 19 z nich využili kombinaci exoskeletonu a tSCS, zatímco 15 jedinců absolvovalo pouze trénink chůze v exoskeletonu. Intervence spočívala v 8 terapiích po dobu 2 týdnů. Skupina s tSCS absolvovala před tréninkem 40minutovou stimulaci vleže na zádech. Výsledky ukázaly významné rozdíly ve skupinách v síle zatížení chodidla. Navíc ve skupině tSCS se zlepšilo senzitivní i motorické skóre.

Další dvě studie se zaměřily na vliv tSCS u pacientů v subakutní fázi po míšní lézi, navíc byly obě randomizované a placebem kontrolované. Estes et al. [19] porovnávali efekt kombinace

tSCS a tréninku lokomoce ve stimulované (8 pacientů) a placebo skupině (8 pacientů 2–6 měsíců po poranění míchy) klasifikovaných AIS B–D. Po 2 týdnech tréninku v lokomatu 3× týdně následovaly 2 týdny obohacené o tSCS nebo placebo stimulaci. Výsledky ukázaly signifikantně delší vzdálenost, a tedy i rychlejší čas ve 2min testu chůze (MWT) u pacientů stimulovaných vůči placebo skupině. Obdobnou studii provedli autoři Comino-Suaréz et al. [20]. Do skupin zařadili 14 a 13 pacientů (AIS C–D) do 6 měsíců od úrazu. Terapie probíhala 5× týdně po dobu 8 týdnů. Skupina s tSCS vykazovala lepší výsledky v motorickém skóre pro dolní končetiny a v chůzových testech po 1 měsíci sledování. Rovněž byl pozorován významný rozdíl v amplitudě maximálního expiračního tlaku (MEP) m. rectus femoris.

Vliv stimulace na funkci horních končetin

Zlepšení funkce horních končetin u osob s vysokou míšní lézí představuje dlouhodobou prioritu výzkumu v oblasti neurorehabilitace. U tetraplegiků má i dílčí obnova motoriky zásadní dopad na kvalitu života. Aplikace tSCS na krční segmenty se v posledních letech ukazuje jako perspektivní nástroj pro neinvazivní ovlivnění míšních okruhů, které zajišťují funkci horních končetin.

Jednou z prvních studií, která prokázala okamžité i dlouhodobé zlepšení funkce ruky, je práce Inanici et al. [21]. U pacienta s chronickou nekompletní lézí C3 vedla 4týdenní kombinace tSCS a cílené fyzioterapie k výraznému zlepšení síly, úchopu i citlivosti, přičemž efekt přetrval i po třech měsících bez další intervence. Na tuto práci navázala rozsáhlejší

studie téhož týmu, která u 6 jedinců s tetraplegií (AIS B–D) potvrdila, že pouze kombinace tSCS a intenzivního tréninku vede k významnému a trvalému zlepšení funkce horních končetin. U 2 motoricky kompletních jedinců došlo k obnovení volního pohybu prstů a u všech účastníků přetrvával efekt i po 3–6 měsících [7].

Podobné výsledky přinesla i studie Freyvert et al. [22], která prokázala, že kombinace tSCS s farmakologickou modulací (buspiron) vede k více než trojnásobnému nárůstu síly stisku a zlepšení funkčních testů (ARAT – action research arm test, MSHK – motorické skóre horních končetin). Také Gad et al. [23] zaznamenali výrazné zlepšení úchopu a motorické kontroly již po 8 aplikacích tSCS u 6 osob s míšní lézí AIS B/C, přičemž efekt přetrvával i bez aktivní stimulace.

Zajímavý pohled přináší i studie Kumru et al. [43], která testovala účinek tSCS v kombinaci s tréninkem úchopu u zdravých dobrovolníků. Výsledky ukázaly, že pouze kombinace obou intervencí vedla k nárůstu síly, zvýšení míšní i kortikální excitability a snížení kortikálního prahu. To naznačuje, že tSCS mění stav neuronálních sítí do plastičtějšího režimu, který je následně formován cíleným tréninkem.

Tefertiller et al. [24] se zaměřili na klinickou aplikaci tSCS u 7 jedinců s tetraplegií, kteří již dříve absolvovali intenzivní rehabilitaci bez prokazatelného efektu. Po 20–80 sezeních kombinujících tSCS s funkčním tréninkem horních i dolních končetin došlo u všech subjektů ke zlepšení v testu CUE-T (capabilities of upper extremities test), u 2 subjektů ke změně AIS klasifikace a u 4 motoricky kompletních jedinců k obnovení volní aktivity dolních končetin během stimulace. Zlepšení bylo zaznamenáno i v oblasti citlivosti a schopnosti stoje. Studie potvrzuje, že i u pacientů funkčně stabilních může tSCS vést k dalšímu funkčnímu zlepšení.

Moritz et al. [25] v rámci multicentrické studie Up-LIFT hodnotili účinnost

a bezpečnost tSCS krční míchy u 60 jedinců s chronickou krční míšní lézí. Po dvouměsíčním rehabilitačním období následovala stejně dlouhá fáze s aplikací tSCS v kombinaci se strukturovaným tréninkem. U 72 % účastníků došlo k významnému zlepšení síly i funkce horních končetin, vč. úchopu a špetky, přičemž zlepšení bylo zaznamenáno také v senzitivních funkcích, kvalitě spánku, snížení spasmů a v subjektivní kvalitě života. Studie neprokázala žádné závažné nežádoucí účinky související s terapií a potvrzuje, že tSCS může být bezpečná a efektivní metoda pro zlepšení funkce horních končetin i v chronické fázi tetraplegie.

Vliv stimulace na posturální stabilitu sedu

Porucha stability sedu je v různé míře přítomná prakticky u všech pacientů po poranění míchy. Příčinou je paréza nebo plegie trupových svalů a svalů dolních končetin. U motoricky kompletních míšních lézí (AIS A a B) určuje její závažnost neurologická úroveň. U krčních a vyšších hrudních lézí se navíc nedostatečně uplatňuje posturální funkce bránice. Ta je dominantně využita k inspiraci kvůli dysfunkci ostatních respiračních svalů. U lézí v bederních a sakrálních segmentech je porucha stability vázaná hlavně na oslabení svalů dolních končetin a pánevního dna. V případě nekompletních lézí AIS C a D závisí stabilita také na rozsahu míšní léze, tedy na možnosti pacienta využít zachovalou svalovou aktivitu pro efektivní svalové souhry trupu a končetin. Zlepšení síly trupových svalů a jejich zapojení do správných stereotypů je hlavní myšlenkou využití tSCS. Dosud se účinkům tSCS specificky na stabilitu sedu věnovala pouze jedna studie.

Autoři Rath et al. [26] zařadili do studie ovlivnění posturální kontroly trupu pomocí tSCS 8 jedinců s chronickou kompletní i nekompletní míšní lézí v úrovni C3–T9. K hodnocení efektu stimulace využili EMG (elektromyografie) trupových svalů, trojrozměrnou kinematiku a data z posturografické silové desky.

Hodnocení probíhalo během klidného sedu, vychylování těžiště při náklonech trupu a při pohybu jednou horní končetinou (vlastní narušení stability). Stimulace vedla ke zvýšené aktivitě m. erector spinae, m. rectus abdominis a m. obliquus abdominis externus, což přispělo ke zlepšení kontroly trupu, přirozenějšímu zakřivení bederní páteře a posazení pánve. Zlepšení stability trupu bylo potvrzeno snížením posunu těžiště tlaku (COP – center of pressure) a zvýšením limitů pro jeho stabilní posun vpřed, vzad a do stran. Rovněž se zlepšila odpověď na vlastní narušení stability. Na základě výsledků se autoři domnívají, že neuromodulace pravděpodobně znovu aktivuje spící míšní okruhy a zlepšuje integraci senzorických a motorických vstupů v reálném čase. Důležité je, že ke zlepšení došlo v chronické fázi míšní léze, což dokazuje, že spinální síť si zachovávají latentní plasticitu i roky po vzniku poranění.

Vliv stimulace na respirační funkce

Respirační dysfunkce je přítomná u široké skupiny jedinců s krční a horní hrudní míšní lézí. I když je zachována funkce bránice jako hlavního inspiračního svalu, může být přítomna významná respirační insuficience a související komorbidita. Snížení respiračního výkonu a dysfunkční kašel přispívají k vysoké respirační morbiditě a mortalitě v této populaci. Respirační fyzioterapie je proto jedním ze základních přístupů v rehabilitaci pacientů po poranění míchy. Na základě výsledků klinických studií, které zkoumají vliv epidurální nebo transkutánní míšní stimulace na zlepšení motorických funkcí, je možné předpokládat, že tSCS krčních neuronálních sítí může usnadnit aktivaci respiračních svalů a zlepšit dechové parametry a schopnost kašle. Využití tSCS v této oblasti bylo dosud publikováno dvěma výzkumnými týmy.

Autoři Gad et al. [27] se v případové studii zaměřili na jednoho pacienta

s chronickou tetraplegií a zhoršenou ventilační funkcí. Aplikace tSCS probíhala vždy 60 min, 5 dní v týdnu, po dobu 2 týdnů. Měření zahrnovala jak objektivní metody, jako je usilovný výdechový objem za jednu sekundu (FEV1), maximální inspirační tlak (MIP) a schopnost odkašlání, tak i subjektivní výsledky hlášené pacientem, jako je dechové úsilí a únava. Výsledky odhalily zvýšení inspirační a expirační kapacity, obnovení schopnosti odkašlat vleže na zádech a subjektivní pocit sníženého dechového úsilí a zvýšení denní energie. Zlepšení navíc přetrvávalo i několik dní po ukončení terapie, což vedlo autory k domněnce, že by mohla stimulace vyvolat i dlouhodobější neuroplastické změny.

Studie Kumru et al. [28] zkoumala účinnost kombinace tSCS a inspiračního svalového tréninku na respirační funkce u 11 jedinců s chronickou tetraplegií. Výsledky ukázaly významné zlepšení maximálního inspiračního (MIP) a expiračního tlaku (MEP), usilovné vitální kapacity (FVC) a zlepšení subjektivně vnímané dušnosti a hypofonie. Naproti tomu samotný inspirační svalový trénink nevedl k žádným statisticky významným změnám. Tyto nálezy ukazují, že tSCS může posilovat efekt tréninku dýchacích svalů a podporovat reorganizaci neuronálních sítí prostřednictvím zvýšení excitability a plasticity zbytkových míšních okruhů.

Vliv stimulace na spasticitu

Spasticita jako klinická manifestace léze horního motoneuronu je častou komplikací po poranění míchy. Ke spasticitě jako nárůstu svalového tonu, který je závislý na rychlosti protažení, se v literatuře často řadí i flekční a extenční spasmy a klonus jako důsledky hyperreflexie. Souhrnně se tyto symptomy někdy označují jako spastické motorické chování [44]. Zásadní je jejich negativní vliv na kvalitu života omezením běžných aktivit, zhoršením sebeobsluhy, působením bolesti a únavy, narušením spánku, rizikem pádů a rozvoje komplikací, jako jsou kontraktury, dekubity a další. Zároveň

může spasticita u nekompletních lézí výrazně interferovat s volným pohybem a bránit tím mobilitě a chůzi [45]. Současné terapeutické postupy se omezují na antispastickou medikaci a fyzioterapeutické intervence s krátkodobým efektem. Několik studií nicméně zkoumalo účinky tSCS na míšní spasticitu.

Autoři Hofstoetter et al. [29] zahrnuli do výzkumu jednorázové aplikace tSCS v délce 30 min 3 účastníky s chronickou motoricky nekompletní lézí doprovázenou výraznou spasticitou. Jedním z výsledků byl konzistentní pokles intenzity reakcí napříč různými modalitami, vč. pasivního pohybu končetin a klonu vyvolaného protažením nebo kožní stimulací. Spasmy bránící plynulému aktivnímu pohybu dolních končetin se rovněž snížily. Studie prokázala i sníženou koaktivaci antagonistických svalových skupin během volných pohybů. Funkčně se tyto výsledky projevily ve zlepšení chůze. Dva ze tří subjektů zkrátily čas potřebný pro ujití 10 m o téměř 40 % po jediné aplikaci tSCS. Autoři uvažují o vlivu tSCS na spasticitu stimulací la aferentních nervů, které mají silné synaptické vazby na la inhibiční interneurony. Tato reciproční inhibice může potlačit hyperaktivní spinální reflexy a zlepšit motorický výkon. Navíc nekompletnost poranění zvyšuje možnost, že tSCS může nepřímo zvýšit sestupnou inhibiční kontrolu. V roce 2020 stejný tým publikoval výsledky rozšířené studie na 12 jedincích s míšní lézí a potvrdil zmírnění spasticity hodnocené baterií testů vč. EMG záznamů [46].

Autoři Freyvert et al. [22] hodnotili ovlivnění spasticity jako jeden z výstupů ve studii, která zkoumala kombinovaný účinek tSCS a serotonergního léku buspiron na obnovení funkce horní končetiny u jedinců s chronickou motoricky kompletní míšní lézí. Zjistili progresivní snížení spasticity ve všech fázích aktivní intervence. Skóre MAS (modifikovaná Ashworthova škála) se konzistentně snižovalo od fáze 1 (pouze placebo) přes fáze 2 až 4, což naznačuje, že jak samotná tSCS, tak v kombinaci s buspironem

přispěla ke snížení svalového hypertonu. Zároveň došlo ke zlepšení síly úchopu a obratnosti rukou, což naznačuje, že intervence nejen znovu zapojily spící motorické dráhy, ale také modulovaly aberantní aktivitu spinálního reflexu zodpovědnou za zvýšený tonus. Toto motorické zlepšení a zmírnění spasticity přetrvávalo i v dalším období sledování.

Zmírnění spasticity ve studii zabývající se efektem tSCS na funkci horních končetin uvádějí také autoři Inanici et al. [7]. Do studie zařadili 6 jedinců s chronickou krční kompletní i nekompletní míšní lézí. Spasticita se u účastníků zmírnila v MAS průměrně o 3,5 bodu, což se rovněž odrazilo ve funkčních výsledcích. Navíc efekt přetrvával 10–15 dní po ukončení stimulace, což opět naznačuje možné trvalé plastické změny v míšních okruzích.

Autoři Samejima et al. [14] sledovali spasticitu během studie zkoumající vliv tSCS krční a bederní páteře v kombinaci s intenzivním tréninkem na zlepšení chůze a autonomních funkcí po chronickém poranění míchy. Studie se zúčastnili 2 muži s chronickou nekompletní krční míšní lézí. Každý z nich podstoupil 2 měsíce intenzivního chůzového tréninku a 2 měsíce vícebodové cervikální a lumbosakrální tSCS. Zatímco po pouhém lokomočním tréninku došlo ke zvýšení spasticity, po zahájení tSCS se u obou účastníků významně snížila. To naznačuje synergický vztah mezi tSCS a tréninkem, kde míšní modulace může tlumit hyperexcitabilní reflexní okruhy, které samotný trénink nedokáže potlačit.

Vliv stimulace na autonomní funkce

Ztráta schopnosti chůze a upoutání na invalidní vozík je nejvíce zřejmý a diskutovaný důsledek míšního poranění. Nicméně při dotazování jedinců s míšní lézí na možné zlepšení kvality života se před stoj a chůzi dostává jako nejvyšší priorita obnovení autonomních funkcí [47]. To zahrnuje znovuzískání kontroly nad mikcí, defekací, sexuálními funkcemi a kardiovaskulární regulací.

Tab. 2. Charakteristiky souboru ve studiích zkoumající efekt tSCS u jedinců s míšní lézí.

Tab. 2. Population characteristics in studies investigating the effect of tSCS in spinal cord injury individuals.

Studie	Počet účastníků	Pohlaví	Věk (r), $\bar{x}$ (SD)	Doba od úrazu (r), $\bar{x}$ (SD)	NLI	AIS	Souběžná intervence
Ovlivnění funkce dolních končetin							
Hofstoetter et al. [10]	1	1 Ž	29	11	T9	D	pohyblivý chodník
Hofstoetter et al. [11]	3	1 Ž, 2 M	32,7 (5,0)	10,7 (1,5)	C5, T9	D	pohyblivý chodník
Gerasimenko et al. [12]	5	5 Ž	31,4 (16,8)	3,2 (1,6)	C5–T4	B	asistovaný pohyb, buspirone
McHugh et al. [13]	10	4 Ž, 6 M	43 (16,8)	13,4 (15,8)	C4–T9	C–D	pohyblivý chodník, odlehčení
Samejina et al. [14]	2	2 M	64	4 (0,5)	C4, C6	D	pohyblivý chodník
Tharu et al. [15]	1	1 M	45	16	T12	B	neurorehabilitace
Al'jabouri et al. [16]	9	3 Ž, 6 M	41,2 (11,3)	5,1 (5,3)	C5–T10	A–C	sed – stoj s dopomocí
Kumru et al. [17]	10	1 Ž, 9 M	43,2 (10,9)	1,1 (1,6)	C3–C8	D	–
Shapkova et al. [18]	19	4 Ž, 15 M	31,2 (8,4)	4,6 (3,3)	C8–L2	A–C	exoskeleton
Estes et al. [19]	18	4 Ž, 14 M	44,4 (15,2)	0,28 (0,1)	C2–T11	C–D	Lokomat
Comino-Suaréz et al. [20]	27	3 Ž, 24 M	48 (15,4)	0,12 (0,1)	C2–T11	C–D	Lokomat
Ovlivnění funkce horních končetin							
Inanici et al. [21]	1	1 M	62	2	C3	D	fyzioterapie
Inanici et al. [7]	6	2 Ž, 4 M	42 (14)	4,6 (3,5)	C3–C5	B–D	funkční trénink
Freyvert et al. [22]	6	2 Ž, 4 M	19,2 (1,2)	2,4 (0,8)	C2–C6	B	buspirone
Gad et al. [23]	6	1 Ž, 5 M	40,2 (15,2)	10 (6,5)	C4–C8	B–C	trénink úchopu
Tefertiller et al. [24]	7	2 Ž, 5 M	29 (13)	1,8 (0,7)	C4–C6	B–D	funkční trénink + lokomoční trénink
Moritz et al. [25]	60	10 Ž, 50 M	47,2 (15,5)	–	C2–C7	B–D	strukturovaná RHB
Ovlivnění stability sedu							
Rath et al. [26]	8	1 Ž, 7 M	29,4 (7,2)	7,3 (3,1)	C3–T9	A, C	–
Ovlivnění respiračních funkcí							
Gad et al. [27]	1	1 M	39	9	C5	A	–
Kumru et al. [28]	11	1 Ž, 10 M	29,3 (10,1)	8,1 (1,8)	C3–C7	A–D	trénink inspiračních svalů

Ovlivnění spasticity							
Hofstoetter et al. [29]	3	1 Ž, 2 M	32,7 (4,1)	10,7 (1,2)	C5, T9	D	–
Ovlivnění autonomních funkcí							
Phillips et al. [30]	5	1 Ž, 4 M	–	–	C5–T2	A–B	–
Engel-Haber et al. [31]	8	8 M	30,3 (14,6)	2,6 (1,5)	C3–C7	A–C	–
Sachdeva et al. [32]	1	1 M	37	3	C4	A	–
Solinsky et al. [33]	2	1 Ž, 1 M	–	–	T3, T5	A	–
Gad et al. [34]	7	3 Ž, 4 M	38,3 (8,1)	5,7 (7,2)	C3–T11	A–C	–
Kreydin et al. [35]	5	1 Ž, 4 M	–	4,2 (3,7)	C4–T9	A, C	–
Kreydin et al. [36]	4	2 Ž, 2 M	32 (4,3)	4,5 (2,9)	C5, T6	A	–

NLI – neurological level of injury (neurologická úroveň léze), AIS – ASIA impairment scale (rozsah míšní léze), AIS A – senzomotoricky kompletní léze, AIS B – senzitivně nekompletní léze, AIS C, D – motoricky nekompletní léze

Možnost ovlivnění autonomních funkcí pomocí tSCS původně vychází tak jako u zlepšení motoriky z experimentů prováděných s epidurální míšní stimulací [48]. Jako u motorických odpovědí je základním mechanismem stimulace aferentních la vláken zadních kořenů, přes které jsou v tomto případě pravděpodobně aktivované somatoautonomní reflexy, jež mohou excitovat nebo inhibovat pre- a postgangliové neurony [49].

Ovlivnění kardiovaskulárních funkcí

Poranění míchy v krčních a horních hrudních segmentech způsobuje kardiovaskulární nestabilitu. Ta se projevuje jako ortostatická hypotenze a autonomní dysreflexie. Ortostatická hypotenze je způsobena poruchou aktivace sympatiku k udržení odpovídajícího krevního tlaku během ortostázy. Autonomní dysreflexie je naopak excesivní nekontrolovaná hypertenze vyvolaná škodlivými podněty pod úrovní poranění, která způsobuje regionální sympatickou excitaci [50].

Autoři Phillips et al. [30] sledovali efekt tSCS u 5 účastníků s krční a horní

hrudní míšní lézí během ortostatické zátky. Po rozvoji ortostatické hypotenze byla zahájena tSCS v úrovni T7/8. Během 60 s došlo u všech subjektů k úpravě krevního tlaku. Byl vyloučen podíl svalové pumpy, protože během stimulace nebyla přítomná kontrakce svalů dolních končetin. Engel-Haber et al. [31] sledovali u 8 účastníků tlakovou odpověď během tSCS v různých míšních úrovních. Konzistentní zvýšení tlaku zaznamenali v lumbosakrálních segmentech, ale ne v krční a hrudní oblasti. Vliv stimulace v úrovni S1/2 na nárůst krevního tlaku vysvětlují možnou retrogradní neuromodulací, která se zvažuje např. při stimulaci zadního tibiálního nervu [51].

Autoři Sachdeva et al. [32] demonstrovali v preklinické studii a klinické kazuistice efekt tSCS na zmírnění autonomní dysreflexie. Jako spouštěč zvolili digitální anorektální stimulaci (DARS). Kontinuální tSCS zapnutá před DARS snížila reakci systolického tlaku na viscerální stimul o 82 % a během DARS o 49 %. Výsledek vysvětlují možnou transsynaptickou aktivací inhibičních interneuronů, které brání nekontrolované

reflexní reakci. Nicméně Solinsky et al. [33] ve studii se 4 účastníky za použití Valsalvova manévru a aplikace fenylefrinu zaznamenali během tSCS pouze sympatoexcitaci, která může naopak snižovat práh pro rozvoj autonomní dysreflexie.

Ovlivnění mikce a defekace

Neurogenní dysfunkce dolních cest močových a střeva je běžným důsledkem míšního poranění se zásadním negativním dopadem na kvalitu života. V případě močových cest je vlivem přerušení drah k sakrálnímu mikčnímu centru porušena jak funkce jímací, tak vyprazdňovací. Nejčastějšími důsledky jsou nízká kapacita při hyperaktivitě detruzoru a detruzoro-sfinkterová dyssynergie, kdy se močový měchýř kontrahuje proti uzavřenému sfinkteru s nárůstem intravezikálního tlaku a rizikem poškození ledvin. Neurogenní dysfunkce střeva se nejčastěji projevuje prodlouženým časem pasáže kvůli poruše inervace levé poloviny tračníku. Důsledkem je chronická zácpa a obtížné vyprazdňování přes hyperaktivní sfinkter [50].

Autoři Gad et al. [34] sledovali vliv tSCS na funkci dolních močových cest u 7 účastníků s míšní lézí nad T11. Stimulace v úrovni T11 s frekvencí 1 Hz vedla ke zlepšení mikce, zvýšení průtoku a snížení rezidua, zatímco stimulace při 30 Hz snížila hyperaktivitu detruzoru během plnění močového měchýře a zvýšila tak jeho kapacitu. Stejný tým publikoval v roce 2020 výsledky dalších 5 pacientů s míšní lézí a navíc 5 pacientů po cévní mozkové příhodě a 5 pacientů s roztroušenou sklerózou. Stimulace probíhala v úrovni T11 a L1 90 min 3× týdně po dobu 8 týdnů. Studie prokázala zvýšení kapacity močového měchýře, ale nebyl zaznamenán vliv na účinnost mikce. Navíc se zlepšilo skóre symptomů neurogenního měchýře (NBSS – neurogenic bladder symptom score) a všichni pacienti hlásili významný pokles epizod močové inkontinence [35].

Tento tým rovněž zkoumal vliv tSCS na neurogenní dysfunkci střeva u 4 účastníků. Anorektální manometrie zaznamenala anorektální kontrakce v oblasti 3–8 cm od análního vchodu během stimulace u 3 subjektů. Jedna pacientka podstoupila dlouhodobou denní stimulaci a po týdnu se zkrátila doba vyprazdňování ze 75 min na 15 min. Po ukončení stimulace došlo opět k jejímu nárůstu [36]. Výsledky uvedených studií potvrzují, že tSCS moduluje aferentní i eferentní neuronální síť a zlepšuje jejich funkční stav.

Limity metody a publikovaných studií

Jak bylo uvedeno výše, tSCS má oproti epidurální variantě výhodu v neinvazivitě, která eliminuje množství rizik a komplikací. Přesto byly v některých studiích publikovány mírné nežádoucí účinky. Jednalo se např. o hyperémii v místě stimulační elektrody, která se upravila do 5–10 min po ukončení stimulace [21]. Přechodnou iritaci kůže popsali i jiní autoři [13,24]. Mezi další nevýznamné nežádoucí účinky patřilo přechodné zvýšení svalového tonu nebo nechtěná aktivace mikčního reflexu [52].

Limity uvedených studií jsou pak především nízké počty účastníků, ale také např. nepřítomnost kontrolní skupiny s falešnou stimulací, u které by se potvrdil nulový efekt.

Závěr

Z uvedených studií vyplývá, že tSCS je perspektivní neinvazivní metoda, která představuje efektivní intervenci v rámci motorické rehabilitace u osob s poraněním míchy. Opakovaně bylo prokázáno, že tSCS zvyšuje excitabilitu neuronálních sítí a otevírá tak prostor pro využití zbytkových signálů eferentních drah, a to i v chronické fázi poranění. Mezi účinky tSCS lze zahrnout nejen aktivní motoriku končetin a trupu, ale také ovlivnění respiračních parametrů, autonomních funkcí a spasticity. Významnou výhodou tSCS je její bezpečnost, relativní dostupnost a dobrá tolerance ze strany pacientů. Ačkoliv výsledky naznačují pozitivní vliv tSCS na obnovu motorických a autonomních funkcí, většina studií má nízkou metodologickou kvalitu. Pro plné využití potenciálu metody je tedy nezbytné doplnění dalších studií zaměřených na definici stimulačních protokolů v závislosti na konkrétních cílech a možnost podpoření efektu tSCS vhodnou kombinací s dalšími metodami [53].

Přesto lze tSCS považovat za perspektivní terapeutický nástroj, jehož další rozvoj může zásadně přispět k novým strategiím léčby a zlepšení kvality života osob s míšní lézí. Svědčí o tom jak předběžné výsledky, tak i rostoucí počet případů částečného obnovení motorických funkcí, a to i u jedinců s klinicky kompletní míšní lézí.

Literatura

1. Minassian K, Persy I, Rattay F et al. Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord. *Muscle Nerve* 2007; 35(3): 327–336. doi: 10.1002/mus.20700.
2. Sherwood AM, Dimitrijevic MR, McKay WB. Evidence of subclinical brain influence in clinically complete spinal cord injury: discomplete SCI. *J Neurol Sci* 1992; 110(1–2): 90–98. doi: 10.1016/0022-510x(92)90014-c.

3. Taccola G, Sayenko D, Gad P et al. And yet it moves: recovery of volitional control after spinal cord injury. *Prog Neurobiol* 2018; 160: 64–81. doi: 10.1016/j.pneurobio.2017.10.004.
4. Hofstoetter US, Freundl B, Binder H et al. Common neural structures activated by epidural and transcutaneous lumbar spinal cord stimulation: elicitation of posterior root-muscle reflexes. *PLoS One* 2018; 13(1): e0192013. doi: 10.1371/journal.pone.0192013.
5. Minassian K, Hofstoetter US, Dzeladini F et al. The human central pattern generator for locomotion: does it exist and contribute to walking? *Neuroscientist* 2017; 23(6): 649–663. doi: 10.1177/1073858417699790.
6. Laliberte AM, Goltash S, Lalonde NR et al. Proprioceptive neurons: essential elements of locomotor control in the intact and possibly the injured spinal cord. *Front Cell Neurosci* 2019; 13: 512. doi: 10.3389/fncel.2019.00512.
7. Inanici F, Brighton LN, Samejima S et al. Transcutaneous spinal cord stimulation restores hand and arm function after spinal cord injury. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2021; 29: 310–319. doi: 10.1109/TNSRE.2021.3049133.
8. Gerasimenko Y, Daniel O, Regnaud JP et al. Mechanisms of locomotor activity generation under epidural spinal cord stimulation. In: Dengler R, Kossev A (eds.). *Sensorimotor Control*. NATO Science Series, I: Life and Behavioural Sciences 2001; 326: 164–171.
9. Hogan MK, Hamilton GF, Horner PJ. Neural stimulation and molecular mechanisms of plasticity and regeneration: a review. *Front Cell Neurosci* 2020; 14: 271. doi: 10.3389/fncel.2020.00271.
10. Hofstoetter US, Hofer C, Kern H et al. Effects of transcutaneous spinal cord stimulation on voluntary locomotor activity in an incomplete spinal cord injured individual. *Biomed Tech (Berl)* 2013; 58(Suppl 1): /j/bmte.2013.58.issue-s1-A/bmt-2013-4014/bmt-2013-4014.xml. doi: 10.1515/bmt-2013-4014.
11. Hofstoetter US, Krenn M, Danner SM et al. Augmentation of voluntary locomotor activity by transcutaneous spinal cord stimulation in motor-incomplete spinal cord-injured individuals. *Artif Organs* 2015; 39(10): E176–186. doi: 10.1111/aor.12615.
12. Gerasimenko YP, Lu DC, Modaber M et al. Noninvasive reactivation of motor descending control after paralysis. *J Neurotrauma* 2015; 32(24): 1968–1980. doi: 10.1089/neu.2015.4008.
13. McHugh LV, Miller AA, Leech KA et al. Feasibility and utility of transcutaneous spinal cord stimulation combined with walking-based therapy for people with motor incomplete spinal cord injury. *Spinal Cord Ser Cases* 2020; 6(1): 104. doi: 10.1038/s41394-020-00359-1.
14. Samejima S, Caskey CD, Inanici F et al. Multi-site transcutaneous spinal stimulation for walking and autonomic recovery in motor-incomplete tetraplegia: a single-subject design. *Phys*

- Ther 2022; 102(1): pzab228. doi: 10.1093/ptj/pzab228.
15. Tharu NS, Wong AYL, Zheng YP. Transcutaneous electrical spinal cord stimulation increased target-specific muscle strength and locomotion in chronic spinal cord injury. *Brain Sci* 2024; 14(7): 640. doi: 10.3390/brainsci14070640.
 16. Al'joboori Y, Massey SJ, Knight SL et al. The effects of adding transcutaneous spinal cord stimulation (tSCS) to sit-to-stand training in people with spinal cord injury: a pilot study. *J Clin Med* 2020; 9(9): 2765. doi: 10.3390/jcm9092765.
 17. Kumru H, Ros-Alsina A, García Alén L et al. Improvement in motor and walking capacity during multisegmental transcutaneous spinal stimulation in individuals with incomplete spinal cord injury. *Int J Mol Sci* 2024; 25(8): 4480. doi: 10.3390/ijms25084480.
 18. Shapkova EY, Pismennaya EV, Emelyanikov DV et al. Exoskeleton walk training in paralyzed individuals benefits from transcutaneous lumbar cord tonic electrical stimulation. *Front Neurosci* 2020; 14: 416. doi: 10.3389/fnins.2020.00416.
 19. Estes S, Zarkou A, Hope JM et al. Combined transcutaneous spinal stimulation and locomotor training to improve walking function and reduce spasticity in subacute spinal cord injury: a randomized study of clinical feasibility and efficacy. *J Clin Med* 2021; 10(6): 1167. doi: 10.3390/jcm10061167.
 20. Comino-Suárez N, Moreno JC, Megía-García Á et al. Transcutaneous spinal cord stimulation combined with robotic-assisted body weight-supported treadmill training enhances motor score and gait recovery in incomplete spinal cord injury: a double-blind randomized controlled clinical trial. *J Neuroeng Rehabil* 2025; 22(1): 15. doi: 10.1186/s12984-025-01545-8.
 21. Inanici F, Samejima S, Gad P et al. Transcutaneous electrical spinal stimulation promotes long-term recovery of upper extremity function in chronic tetraplegia. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2018; 26(6): 1272–1278. doi: 10.1109/TNSRE.2018.2834339.
 22. Freyvert Y, Yong NA, Morikawa E et al. Engaging cervical spinal circuitry with non-invasive spinal stimulation and buspirone to restore hand function in chronic motor complete patients. *Sci Rep* 2018; 8(1): 15546. doi: 10.1038/s41598-018-33123-5.
 23. Gad P, Lee S, Terrafranca N et al. Non-invasive activation of cervical spinal networks after severe paralysis. *J Neurotrauma* 2018; 35(18): 2145–2158. doi: 10.1089/neu.2017.5461.
 24. Tefertiller C, Rozwod M, VandeGriend E et al. Transcutaneous electrical spinal cord stimulation to promote recovery in chronic spinal cord injury. *Front Rehabil Sci* 2021; 2: 740307. doi: 10.3389/fresc.2021.740307.
 25. Moritz C, Field-Fote EC, Tefertiller C et al. Non-invasive spinal cord electrical stimulation for arm and hand function in chronic tetraplegia: a safety and efficacy trial. *Nat Med* 2024; 30(5): 1276–1283. doi: 10.1038/s41591-024-02940-9.
 26. Rath M, Vette AH, Ramasubramaniam S et al. Trunk stability enabled by noninvasive spinal electrical stimulation after spinal cord injury. *J Neurotrauma* 2018; 35(21): 2540–2553. doi: 10.1089/neu.2017.5584.
 27. Gad P, Kreydin E, Zhong H et al. Enabling respiratory control after severe chronic tetraplegia: an exploratory case study. *J Neurophysiol* 2020; 124(3): 774–780. doi: 10.1152/jn.00320.2020.
 28. Kumru H, García-Alén L, Ros-Alsina A et al. Transcutaneous spinal cord stimulation improves respiratory muscle strength and function in subjects with cervical spinal cord injury: original research. *Biomedicine* 2023; 11(8): 2121. doi: 10.3390/biomedicine11082121.
 29. Hofstoetter US, McKay WB, Tansey KE et al. Modification of spasticity by transcutaneous spinal cord stimulation in individuals with incomplete spinal cord injury. *J Spinal Cord Med* 2014; 37(2): 202–211. doi: 10.1179/2045772313Y.0000000149.
 30. Phillips AA, Squair JW, Sayenko DG et al. An autonomic neuroprosthesis: noninvasive electrical spinal cord stimulation restores autonomic cardiovascular function in individuals with spinal cord injury. *J Neurotrauma* 2018; 35(3): 446–451. doi: 10.1089/neu.2017.5082.
 31. Engel-Haber E, Bheemreddy A, Bayram MB et al. Neuromodulation in spinal cord injury using transcutaneous spinal stimulation-mapping for a blood pressure response: a case series. *Neurotrauma Rep* 2024; 5(1): 845–856. doi: 10.1089/neur.2024.0066.
 32. Sachdeva R, Nightingale TE, Pawar K et al. Noninvasive neuroprosthesis promotes cardiovascular recovery after spinal cord injury. *Neurotherapeutics* 2021; 18(2): 1244–1256. doi: 10.1007/s13311-021-01034-5.
 33. Solinsky R, Burns K, Tuthill C et al. Transcutaneous spinal cord stimulation and its impact on cardiovascular autonomic regulation after spinal cord injury. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2024; 326(1): H116–H122. doi: 10.1152/ajpheart.00588.2023.
 34. Gad PN, Kreydin E, Zhong H et al. Non-invasive neuromodulation of spinal cord restores lower urinary tract function after paralysis. *Front Neurosci* 2018; 12: 432. doi: 10.3389/fnins.2018.00432.
 35. Kreydin E, Zhong H, Latack K et al. Transcutaneous electrical spinal cord neuromodulator (TESCoN) improves symptoms of overactive bladder. *Front Syst Neurosci* 2020; 14: 1. doi: 10.3389/fnsys.2020.00001.
 36. Kreydin E, Zhong H, Lavrov I et al. The effect of non-invasive spinal cord stimulation on anorectal function in individuals with spinal cord injury: a case series. *Front Neurosci* 2022; 16: 816106. doi: 10.3389/fnins.2022.816106.
 37. Singh G, Lucas K, Keller A et al. Transcutaneous spinal stimulation from adults to children: a review. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2023; 29(1): 16–32. doi: 10.46292/sci21-00084.
 38. Tran K, Steele A, Crossnoe R et al. Multi-site lumbar transcutaneous spinal cord stimulation: When less is more. *Neurosci Lett* 2024; 820: 137579. doi: 10.1016/j.neulet.2023.137579.
 39. Megía García A, Serrano-Muñoz D, Taylor J et al. Transcutaneous spinal cord stimulation and motor rehabilitation in spinal cord injury: a systematic review. *Neurorehabil Neural Repair* 2020; 34(1): 3–12. doi: 10.1177/1545968319893298.
 40. Meyer C, Hofstoetter US, Hubli M et al. Immediate effects of transcutaneous spinal cord stimulation on motor function in chronic, sensorimotor incomplete spinal cord injury. *J Clin Med* 2020; 9(11): 3541. doi: 10.3390/jcm9113541.
 41. Ladenbauer J, Minassian K, Hofstoetter US et al. Stimulation of the human lumbar spinal cord with implanted and surface electrodes: a computer simulation study. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2010; 18(6): 637–645. doi: 10.1109/TNSRE.2010.2054112.
 42. Gerasimenko Y, Gorodnichev R, Puhov A et al. Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans. *J Neurophysiol* 2015; 113(3): 834–842. doi: 10.1152/jn.00609.2014.
 43. Kumru H, Flores Á, Rodríguez-Cañón M et al. Cervical electrical neuromodulation effectively enhances hand motor output in healthy subjects by engaging a use-dependent intervention. *J Clin Med* 2021; 10(2): 195. doi: 10.3390/jcm10020195.
 44. Kriz J, Nasincova Z, Gallusova V et al. Muscle excitability scale for the assessment of spastic reflexes in spinal cord injury: development and evaluation. *Spinal Cord* 2024; 62(9): 532–538. doi: 10.1038/s41393-024-01016-2.
 45. Adams MM, Hicks AL. Spasticity after spinal cord injury. *Spinal Cord* 2005; 43(10): 577–586. doi: 10.1038/sj.sc.3101757.
 46. Hofstoetter US, Freundl B, Danner SM et al. Transcutaneous spinal cord stimulation induces temporary attenuation of spasticity in individuals with spinal cord injury. *J Neurotrauma* 2020; 37(3): 481–493. doi: 10.1089/neu.2019.6588.
 47. Anderson KD. Targeting recovery: priorities of the spinal cord-injured population. *J Neurotrauma* 2004; 21(10): 1371–1383. doi: 10.1089/neu.2004.21.1371.
 48. Rybka V, Kříž J. Možnosti využití epidurální stimulace u jedinců s motoricky kompletní míšní lézí. *Cesk Slov Neurol N* 2025; 88(1): 9–14. doi: 10.48095/cccsnn20259.
 49. Samejima S, Shackleton C, Miller T et al. Mapping the iceberg of autonomic recovery: mechanistic underpinnings of neuromodulation following spinal cord injury. *Neuroscientist* 2024; 30(3): 378–389. doi: 10.1177/10738584221145570.
 50. Kříž J. Poranění míchy: Příčiny, důsledky, organizace péče. Praha: Galén 2019.

51. Levin PJ, Wu JM, Kawasaki A et al. The efficacy of posterior tibial nerve stimulation for the treatment of overactive bladder in women: a systematic review. *Int Urogynecol J* 2012; 23(11): 1591–1597. doi: 10.1007/s00192-012-1712-4.

52. Sayenko DG, Rath M, Ferguson AR et al. Self-assisted standing enabled by non-invasive spinal stimulation after spinal cord injury. *J Neurotrauma* 2019; 36(9): 1435–1450. doi: 10.1089/neu.2018.5956.

53. Tajali S, Balbinot G, Pakosh M et al. Modulations in neural pathways excitability post transcutaneous spinal cord stimulation among individuals with spinal cord injury: a systematic review. *Front Neurosci* 2024; 18: 1372222. doi: 10.3389/fnins.2024.1372222.

Doručeno/Submitted: 30. 7. 2025

Přijato/Accepted: 19. 11. 2025

Korespondenční autor:

doc. MUDr. Jiří Kríž, Ph.D.

Spinální jednotka při Klinice rehabilitace

a tělovýchovného lékařství

2. LF UK a FN Motol a Homolka

V Úvalu 84

150 06 Praha 5

e-mail: jiri.kriz@fnmotol.cz

Konflikt zájmů: Autoři deklarují, že text článku odpovídá etickým standardům, byla dodržena anonymita pacientů a prohlašují, že v souvislosti s předmětem článku nemají finanční, poradenské ani jiné komerční zájmy.

Publikační etika: Příspěvek nebyl dosud publikován ani není v současnosti zaslán do jiného časopisu pro posouzení. Autoři souhlasí s uveřejněním svého jména a e-mailového kontaktu v publikovaném textu.

Dedikace: Článek není podpořen grantem ani nevznikl za podpory žádné společnosti.

Redakční rada potvrzuje, že rukopis práce splnil ICMJE kritéria pro publikace zasílané do biomedicínských časopisů.

Conflict of Interest: The authors declare that the article/manuscript complies with ethical standards, patient anonymity has been respected, and they state that they have no financial, advisory or other commercial interests in relation to the subject matter.

Publication Ethics: This article/manuscript has not been published or is currently being submitted for another review. The authors agree to publish their names and e-mails in the published article/manuscript.

Dedication: The article/manuscript is not supported by a grant nor has it been created with the support of any company.

The Editorial Board declares that the manuscript met the ICMJE "uniform requirements" for biomedical papers.