

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ DEFORMACE PENISU PŘI INDURATIO PENIS PLASTICA PO TERAPII RÁZOVÝMI VLNAMI (SWT)

MATHEMATICAL MODELING OF PENILE DEFORMATION IN PEYRONIE'S DISEASE AFTER SHOCK WAVE THERAPY

Pavel Drlík¹, Jan Loško², Vladimír Křístek²,
Oto Köhler¹

¹Urologické oddělení ÚVN, Praha

²Fakulta stavební ČVUT, Praha

Došlo: 20. 9. 2011.

Přijato: 20. 2. 2012.

Kontaktní adresa

MUDr. Pavel Drlík

Urologické oddělení ÚVN

U Vojenské nemocnice 1200, 162 09 Praha 6

e-mail: pavel.drlik@uvn.cz

Souhrn

Drlík P, Loško J, Křístek V, Köhler O. Matematické modelování deformace penisu při induratio penis plastica po terapii rázovými vlnami (SWT)

Cíl:

Cílem práce je prezentace výsledků matematického modelování deformace penisu u induratio penis plastica při terapii rázovými vlnami.

Metody:

Nejprve byl matematicky řešen model normálního penisu v klidovém a ztopořeném stavu. K výpočtu byla použita metoda konečných prvků (Finite Element Method). Poté byla řešena stejná úloha u penisu deformovaného fibrózním plátem. Tento rigidní prvek měl tyto vlastnosti: Neroztahoval se na vnější popud a svojí tuhostí naopak bránil volnému rozta-

žení okolních prvků, a vyvolával tak pole významných doplňkových napětí ve svém okolí a byl příčinou deformity celého objektu. Nakonec byl řešen model po úspěšné terapii rázovými vlnami na litotryptoru Medilit 7. V úloze bylo vycházeno z reálných průměrných rozměrových parametrů zkoumaného objektu, průměrné velikosti plátu, průměrné velikosti deviace a průměrné hodnoty zlepšení deformity v souboru nemocných léčených na našem pracovišti.

Výsledky:

Z matematického modelování vyplynulo, že deviace ztopořeného penisu probíhá ve směru polohy rigidního prvku (fibrózního plátu). V samotném plátu vznikají výrazná tahová napětí, která mohou vyvolat i příčné zúžení. Významná napětí, která se objevují v okolí plátu, též negativně ovlivňují deviaci penisu z hlediska funkčnosti.

Závěr:

Na základě aplikace matematických modelů lze vysvětlit mechanismus jevu a na tomto základě navrhnout postup pro redukci nežádoucí deformity penisu při erekci: jednak odstraněním celého rigidního prvku (cíl chirurgického řešení) nebo nově – podle navrhovaného přístupu – narušením postiženého elementu tak, aby při erekci sice nedilatoval, avšak svou tuhostí nebránil roztažení okolí. Tento princip byl aplikován léčbou rázovými vlnami.

Klíčová slova:

Matematický model, induratio penis plastica, rázová vlna, dorzální angulace.

Summary

Drlík P, Loško J, Křístek V, Köhler O. Mathematical modeling of penile deformation in Peyronie's disease after shock wave therapy

Aim:

Mathematical modeling of penile deformation in Peyronie's disease after shock wave therapy.

Methods:

Initially, a model of the penis in flacid and in erect state was created. The Finite Element Method Analysis was used. Subsequently the same model was used to analyse the penis affected by a fibrous plaque. The rigid element had the following characteristics: it was not possible to stretch it on external impulse and its stiffness on the contrary restricted free expansion of surrounding elements and induced deformity of the object. Finally we analyzed the model for successful and unsuccessful treatment with shock waves, which were delivered by the lithotripter Medilit 7. The task was derived from real average size parameters of the object, average plaque size, average extent of deviation and average improvement of deformity in patients treated at our department.

Results:

The mathematical model showed that the deflection of the erected penis is in the direction of the rigid component (fibrous plaque). The plaque itself is affected by significant tensile stress that can cause its transverse narrowing; significant tension also arises around the plaque. Significant deviation of the penis results in negative effect on function and quality of life.

Conclusion:

Based on the application of mathematical models we can reduce undesirable deformity of the penis during erection either by removal of the whole rigid element via surgery or by disrupting the affected element, so that during erection its reduced rigidity does not restrict volume changes of the adjacent area – this is likely the principle applied with application of the shock wave treatment.

Key words:

mathematical model, Peyronie's disease, shock wave, dorsal angulation.

ÚVOD

Induratio penis plastica (IPP) byla popsána 1561 Fallopiem a Vesaliem jako fibrózní kavernozitida. Tímto onemocněním se také důkladněji zabýval osobní lékař francouzského krále Ludvíka XIV. François de la Peyronie, který zpracoval studii o plastické induraci penisu a doporučil terapeutické postupy v léčbě tohoto onemocnění (1743) (1). Od té doby se používá výraz induratio penis plasticae neboli morbus Peyronie. V minulosti se léčbou této deformace zabývala řada lékařů a vzdělanců (boloňský biskup Theodorik – 13. století). Starší autoři považovali induratio penis plastica za vzácné onemocnění s velkou tendencí regrese, ale nejnovější studie zaznamenávají

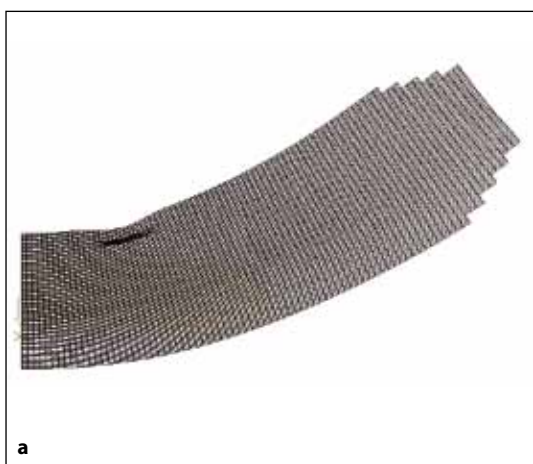
pouze výjimečně spontánní vymizení. Prevalence IPP v posledních desetiletích stoupá. Dnes se pohybuje v rozmezí 6–10 % (1). IPP je onemocnění, které lokálně postihuje tunika albuginea, nejčastěji na dorzu a boku kavernózních těles. Etiologie této choroby není zcela objasněna. Nejnověji se uvažuje o poruše hojení poranění (tzv. mikrovaskulární trauma) a autoimunitních onemocněních vazivové tkáně (analogie Dupuytrenovy kontraktury) (2, 3). Onemocnění se manifestuje několika způsoby. Někteří pacienti udávají náhlý vznik deviace penisu, aniž by kdykoliv předtím pociťovali bolestivou erekci. U jiných se objevuje nejprve bolestivá erekce, která je po několika

**Obr. 1.**

Dorzální angulace penisu před výkonem

Fig. 1.

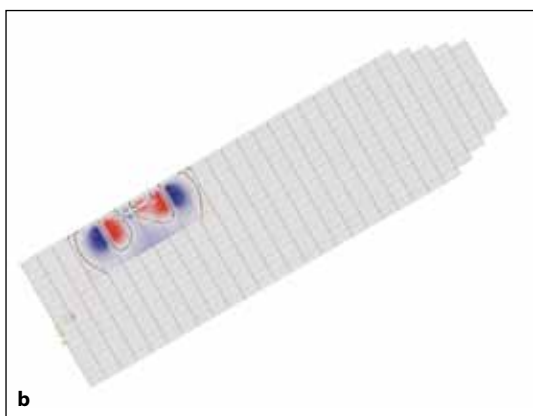
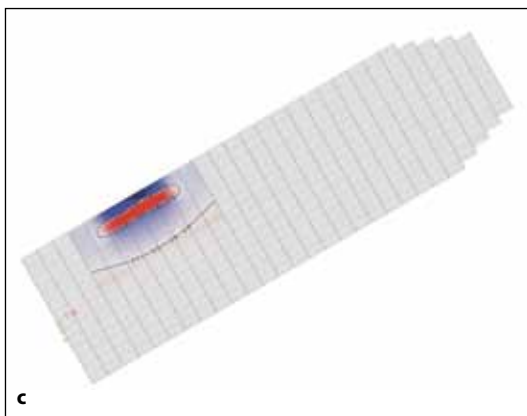
Dorsal angulation of the penis before the procedure

**a****Obr. 2.**

a – výpočtová predikce deformovaného tvaru objektu; b – oblast poruchy s vykreslením podélného napětí vznikajícího v prvcích při dysfunkci tělísek (poloha poruchy $x = 10\text{ mm}$, $y = -7\text{ mm}$; c – oblast poruchy s vykreslením příčného napětí vznikajícího v prvcích při dysfunkci tělísek (poloha poruchy $x = 10\text{ mm}$, $y = -7\text{ mm}$)

Fig. 2.

a – the computational prediction of the deformed shape of the object; b – distribution of longitudinal stresses generated in the elements at dysfunction glands (fault location $x = 10\text{ mm}$, $y = -7\text{ mm}$); c – distribution of tensile stresses generated in the elements at dysfunction glands (fault location $x = 10\text{ mm}$, $y = -7\text{ mm}$)

**b****c**

měsících provázena zakřivením pyje. Většina pacientů si stěžuje na zkrácení penisu. Z akutní fáze Peyronieho choroba přechází do klidového stadia, které je charakterizováno trvalou

přítomností deformace. Deformace je vyjádřena zakřivením a zkrácením penisu. Vznik tuhé jizvy (plátu) má za následek vznik penilních dysfunkcí. U více než 50 % mužů dochází

k deformaci penisu při erekci (obr. 1), a tím k obtížím při pohlavním styku, což negativně ovlivňuje kvalitu života nejen postižených mužů, ale i jejich partnerek. Terapii IPP dělíme na konzervativní a chirurgickou. Konzervativní terapie zahrnuje perorální podávání vitamínu E, kolchicinu, L-argininu, injekční aplikaci steroidů, kolagenázy, verapamilu nebo interferonu přímo do pláku. Mezi konzervativní postupy se řadí i aplikace ultrazvuku nebo rázové vlny (SWT) do plátu (4). Chirurgické řešení je doporučováno po selhání konzervativní terapie (operace dle Nesbita 1965, dle Yaschii 1993) (5). SWT je nechirurgická léčebná modalita, která je v současnosti využívána po celém světě (převážně v Německu, Itálii, Švýcarsku) (6, 7).

Mechanismus účinku extrakorporální terapie rázovými vlnami není zcela zřejmý. Vzhledem k rozdílné hustotě tkáně penisu a plátu pravděpodobně rozrušuje rázová vlna fibrózní plak, a tak výrazně snižuje jeho tuhost. Většina studií popisuje zlepšení erektilních funkcí, zmenšení plátů a zmenšení angulace deformity při erekci. Zlepšení deformity penisu při erekci se popisuje podle různých studií až 74 %. Výkon je minimálně bolestivý a dobře tolerován. U některých pacientů se po výkonu objeví drobné podkožní petechie a iniciální makroskopická hematurie. Z hlediska ověření efektu terapie a pochopení příčin a vývoje onemocnění před a po terapii byl vytvořen matematický výpočtový model se zahrnutím známých skutečností velikosti plátu a úhlu deviace. Odezva – idealizovaná matematickým modelem – byla následně analyzována účinky zadaných vlivů (vynucená deformace, velikost rigidního elementu) některou z metod.

MATERIÁL A METODA

Na Urologickém oddělení Ústřední vojenské nemocnice v Praze jsou aplikovány u pacientů po předchozí neúspěšné konzervativní terapii Peyroniho choroby do místa plátu rázové vlny. Zhodnocena byla skupina 18 pacientů, kteří byli léčeni od března 2007 do června 2009. Ke zlepšení deviace a zmenšení plátu došlo ve 14 případech. Jednalo se o 77 % nemocných. U čtyř pacientů byl stav po léčbě nezměněn. Výkon byl prováděn v pozici obkročmo nebo na břiše, kdy pacient položil

penis na vrchol naplněného vaku do oblasti ohniska jiskřiště (8). Rázové vlny byly aplikovány na elektrohydraulickém litotryptoru MEDILIT 7 (výrobce MEDIPO Brno), průměrně ve dvou dobách.

Matematický model studovaného objektu byl vytvořen na základě představy o mechanismu jevu. Následně byly provedeny rozsáhlejší parametrické studie a analýzy citlivosti na jednotlivé parametry. Současné metody počítačové mechaniky umožňují realisticky modelovat fyzikální objekty v jejich skutečném tvarovém uspořádání a získat popis jejich chování (vývoj tvaru, rozložení a velikosti napětových složek namáhajících objekt).

Používané metody výpočtu mohou být čistě analytické, zahrnující řešení příslušných (obvykle diferenciálních) rovnic v uzavřeném tvaru, ve tvaru řad apod., které poskytují obecnou představu o povaze jevu. Pro řešení této konkrétní úlohy, z důvodu složitého tvarového uspořádání, materiálových relací a okrajových podmínek je však tento přístup prakticky nepoužitelný. V tomto případě jsou vhodné metody finitní, kdy daný jev je převáděn na řešení soustavy algebrických rovnic (metoda sítí, kolokační metoda nebo diskretizace kontinua – metoda prvků). Pro výpočtové analýzy se v současné době rutinně používá zejména metoda konečných prvků (Finite Element Method).

V námi řešeném případě byl nejprve řešen model normálního penisu v klidovém a ztopořeném stavu. Poté byl modelován penis s rigidním plátem o určité velikosti v klidové fázi a při erekci. V úloze bylo vycházeno z reálných průměrných rozměrových parametrů zkoumaného objektu, průměrné velikosti plátu, průměrné velikosti deviace a průměrné hodnoty zlepšení deformity. Idealizace objektu konečnými prvky je ukázána na obrázku 2a. Jejich rozložení a velikost jsou voleny tak, aby dostatečně věrně aproximovaly objekt, a zejména, aby jejich velikost odpovídala rozměrům defektů, jejichž vliv je předmětem zkoumání.

V klidovém stavu byla zvolena velikost objektu 70 mm délky a 20 mm šířky. K simulaci funkce jednotlivých topořivých tělísek bylo využito modelu jednotlivých plátů o rozměru 2,5 × 0,5 mm. Tvar pro studii byl z důvodu výpočetní simulace zjednodušen. Použitá síť prvků výpočtu z důvodu relevantnosti výsledků nepřesáhla rozměr 1 × 0,5 mm.

Naše analýza zahrnovala tři stupně:

1. klidový stav charakterizovaný nízkými materiálovými parametry (modul pružnosti), zatížený působením vlastní tíhy;
2. stav ztužení objektu bez defektu, charakterizovaný vyššími materiálovými parametry (modul pružnosti); nárůst rozměrů objektu je modelován dilatací vyvolanou erekcí – vymodelovaná struktura z jednotlivých plátů byla takto dilatována, aby finální tvar objektu s funkční soustavou všech tělísek dosahoval délky 140 mm a šíře 40 mm;
3. stav ztopoření objektu s defektem v rozsahu jednoho konečného prvku; tomuto speciálnímu prvku nebyla udělena schopnost dilatace, a proto svou tuhostí naopak brání rozvoji volné dilatace v okolí tohoto speciálního prvku, která by odpovídala druhému stupni. Tento rigidní prvek má tyto vlastnosti: Neroztahuje se na vnější popud a svojí tuhostí naopak brání volnému roztažení okolních prvků a vyvolává deformitu celého objektu.

Simulace samotné poruchy byla provedena v několika oblastech vždy dysfunkcí čtyř plátů – tedy o celkovém rozměru lokalizované poruchy 5×1 mm (z důvodu minimalizace deformací a stability výpočetního postupu). Body této poruchy byly voleny ve vzdálenostech 5–35 mm od kořene v klidovém stavu a ve vzdálenosti od povrchu 2–6 mm. Dysfunkce se projevila jako nedeformování plátu mezi klidovým a ztopořeným stavem – modelově: Nedochozí k dilataci plátů, a tím ke vzniku deformace měřitelné jak na povrchu struktury, tak jako deviace celkového tvaru.

VÝSLEDKY

V kontaktní oblasti mezi zdravou tkání představovanou aktivními pláty a postiženou tkání odpovídající plátům postižených dysfunkcí dochází ke vzniku deformací a napětí, která mohou být doprovázena poškozením či jinými nežádoucími jevy. Zejména se jedná o lokalizované namáhání dysfunkčních prvků tahovým napětím. To ukazuje na snahu okolních aktivních plátů dysfunkční prvky deformovat (roztahovat – dysfunkční prvky však této deformaci odolávají svojí tuhostí). Zároveň jsou aktivní prvky v kontaktní oblasti „drženy“ – je jim zabráněno v deformaci; v oblastech mezi postiženými pláty a vnějším okrajem vznikají další tlaková napětí. Vizualním pro-

jevem je deformace objektu. Tento jev nabývá na intenzitě s přibližováním dysfunkčních plátů k povrchu samotného objektu a zároveň se zvětšuje jeho celková deformace (obr. 2).

Jak je patrné z obrázku 2 (porucha je 10 mm od kořene, 3 mm od povrchu v klidovém stavu; rozměr dysfunkce (2×2 pláty) (5×1 mm), jsou dysfunkční pláty vystaveny zejména podélnému namáhání od aktivních okolních tělísek a příčnému namáhání v krajních oblastech poruchy. Takto namáhané pláty jsou „trhány“ okolní dilatující se tkání. Oproti tomu modře zbarvená oblast aktivních prvků na obrázku 2 je indikací tlakové zóny, která je ovlivněna poruchou a je jí bráněno v přetváření v rámci celého systému – vznik deformace na povrchu.

DISKUSE

Nápravy deformace lze docílit jednak odstraněním celého rigidního prvku (cíl chirurgického řešení), nebo mnohem šetrnější a pro pacienta komfortnější aplikací navržené metody: Narušením postiženého elementu tak, aby sice aktivně přirozeným způsobem nezvětšoval svůj objem, ale rozrušením své tuhosti při erekci nebránil volnému roztažení ve svém okolí. V tom spočívá hlavní přínos prezentované studie – výpočtové prokázání funkčnosti předpokládaného principu aplikovaného při léčbě rázovými vlnami.

Analytická studie též plně objasnila mechanismus vzniku tvarové deformace objektu působením plaku majícího tkáňové charakteristiky zcela odlišné od původní zdravé tkáně. Zároveň prokázala efekt umístění plátů v různých hloubkách objektu a prokázala vznik a orientaci napětí v objektu v okolí plátů vyvolaných stísněním volné dilatace. Toto porozumění principu problému umožní cíleně aplikovat léčebné postupy.

Předností analytického přístupu je možnost zpracování parametrických studií s variacemi vstupních parametrů (velikost plátu, jeho poloha a uložení), velmi snadného v porovnání s náročnými a nákladnými experimentálními a sledovacími pracemi. V literatuře jsme se s žádnou publikací, se kterou bychom mohli naše zkušenosti s modelováním deviace penisu u induratio penis plastica porovnat, nesetkali. Jedná se o první výsledky matematického modelování, které ukázaly použitelnost uvedené metody a podrobnější testování je předmětem dalšího výzkumu.

ZÁVĚR

Deformace – deviace ztopořené penisu probíhá ve směru polohy rigidního prvku. Tato deformace je tím výraznější, čím je tento prvek blíže k povrchu. V samotném tuhém prvku při tom vznikají též výrazná tahová napětí (která mohou vyvolat příčné zúžení penisu, a tím i nejspíše zhoršit prokrvení tohoto prvku). Též v okolí to-

hoto tuhého elementu vznikají významná napětí (někdy tahová, jinde tlaková), která mohou i toto okolí z hlediska funkčnosti ovlivňovat.

Konflikt zájmů: Jedná se o nezávislou publikaci. Autoři této práce nemají žádné finanční vztahy s firmou, která je výrobcem použitého litotryptoru (MEDIPO – ZT s.r.o.) a ani od ní nezískali jiné benefity.

LITERATURA

1. **Muller A, Akin-Olugbade Y, Deveci S, et al.** The Impact of Shock Wave Therapy at Varied Energy and Dose Levels on Functional and Structural Changes in Erectile Tissue. *Eur Urol* 2008; 53: 635–643.
2. **La Peyronie F.** Sur quelques obstacles qui s'opposent à l'éjaculation naturelle de la semence. *Mem Acad Royale Chir* 1743; 1: 337–342.
3. **Van de Water L.** Mechanisms by which fibrin and fibronectin appear in healing wounds: implications for Peyronie's disease. *J Urol* 1997; 157: 306–310.
4. **Devine CJ.** Introduction to Peyronie's Disease. *J Urol* 1997; 157: 272–275.
5. **Williams G, Green NA.** The non-surgical treatment of Peyronie's disease. *Br J Urol* 1980; 52: 392–395.
6. **Yaschia D.** Corporal plication for surgical of Peyronie's disease. *J Urol* 1993; 149: 869.
7. **Levine LA.** Review of current nonsurgical management of Peyronie's disease. *Int J Import Res* 2003; 15: 113–120.
8. **Drlík P, Köhler O.** Naše zkušenosti s aplikací rázové vlny u pacientů s induratio penis plastica (průměrná doba sledované 13 měsíců). *Ces Urol* 2010; 14(3): 1–3.

Vážené kolegyně a kolegově,

článek MUDr. P. Drlíka a spolupracovníků nás přivádí k neobvyklému pohledu na typicky urologické onemocnění a na matematické modelování fyzikálních jevů způsobených fibrózním plátem a následně rázovou vlnou.

Rádi uveřejníme vaše komentáře.

šéfredaktor a výkonná redakční rada