

Michal ŠTAFĀ¹, Petr FRANTÍK²

PLASTIZACE TENKOSTĚNNÉHO NOSNÍKU POMOCÍ PRUŽINOVÝCH SÍTÍ

PLASTICITY OF THINWALLED BEAM MODELED BY SPRING NETWORKS

Abstrakt

Příspěvek představuje dynamický systém využívající fyzikální diskretizaci pomocí pružinové sítě. Popisuje jednotlivé fáze diskretizačního postupu na praktické, ale zároveň výpočetně náročné nelineární úloze. Všímá si současných aspektů modelu a rovněž demonstruje využití paralelních výpočtů prostřednictvím platformy Nvidia CUDA.

Klíčová slova

Dynamický systém, fyzikální diskretizace, FyDiK3D, CUDA, tetrahedronizace.

Abstract

The paper represents dynamical system with use of physical discretization method based on spring networks. It describes every phase of used discretization process on practical but also time-consuming non-linear task. It observes contemporary model aspects and demonstrates use of parallel computation technique by Nvidia CUDA platform.

Keywords

Dynamical system, physical discretization, FyDiK3D, CUDA, tetrahedronization.

1 ÚVOD

Silně nelineární problémy mechaniky jako plastická deformace nebo rozvoj trhlin v heterogenních materiálech, se velmi obtížně modelují klasickými metodami mechaniky kontinua [1]. Jedním ze způsobů jak tento problém řešit je použití metody fyzikální diskretizace, která byla poprvé aplikována již před několika desítkami let [2].

Nejpoužívanější přístupy zavádí rozdělení kontinua na pružinové prvky zajišťující silové interakce mezi částicemi a částice jako nositele hmotnosti. Takovouto implementaci je poměrně snadné provést ve 2D, tak i v 3D formě. Výstižnosti modelu se zejména ve 2D dosahuje použitím více typů pružin, které lépe vystihují jednotlivé vnitřní síly. Modely 3D se hlavně díky vysoké výpočetní náročnosti zatím příliš neuplatňují a přitom, právě ty by mohly lépe vystihnout chování materiálu, jelikož mají principiálně nejbližší k jeho mikroskopické struktuře.

Na VUT v Brně je již několik let vyvíjen diskretizační 3D model FyDiK3D, který se navíc od výše zmíněných liší tím, že je postaven na bázi dynamických systémů, což umožňuje vystihnout i mechanickou odezvu materiálu v čase.

¹ Ing. Michal Štafa, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, e-mail: stafa.m@fce.vutbr.cz.

² Ing. Petr Frantík, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, e-mail: kitnarf@centrum.cz, www: http://kitnarf.cz.

Zda a jak je použitý model schopen se vypořádat například s úlohou plastické deformace ocelového nosníku, a zda je výpočetní náročnost takového dynamického modelu se stovkami tisíc stupňů volnosti únosná, se pokouší zodpovědět tento příspěvek.



Obr. 1: Modelovaný nosník

2 MODEL

Model je tvořen body, ve kterých se koncentruje hmotnost modelovaného tělesa. Ty na sebe navzájem působí prostřednictvím sítě interakčních pružin s definovanou silovou funkcí. Tímto je vytvořena prostorová příhradovina vystihující chování materiálu podobné jeho mikroskopické bázi. Podrobněji o FyDiK3D modelu viz [3],[4].

Vytvoření takovéto příhradoviny s přiřazenými materiálovými vlastnostmi ovšem předchází několik fází. Nejprve je zapotřebí vymezit objem tělesa, který se takto diskretizuje. Následně je vevnitř a v jeho definovaném okolí je vygenerována co největší množina bodů splňující podmínku, že žádné dva body množiny neleží sobě blíže, než určitá vzdálenost. Body jsou za uvedené podmínky generovány pomocí sekvence s nízkou diskrepancí, případně pseudonáhodně. Použitím takovýchto postupů je vůči pravidelnému generování lépe reprezentovaná nerovnoměrná vnitřní struktura materiálu, či případné výrobní vady. Míru této nerovnoměrnosti lze korigovat hustotou generovaných bodů a jejich nejmenší vzdáleností.

Nad vytvořenou množinou bodů je v dalším kroku vytvářena Deloneho tetrahedronizace (viz obr. 3), tedy množina tetraedrů – čtyřstěnů, u nichž platí, že žádný bod neleží v kouli opsané vzniklého čtyřstěnu. Tetrahedronizace je prováděna inkrementálním (přírůstkovým) algoritmem, který je například představen v [5].

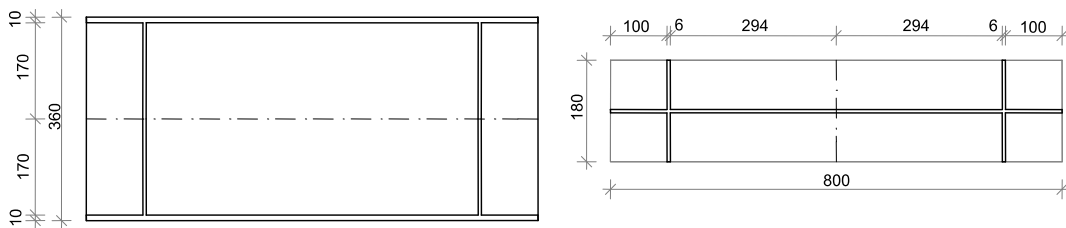
Převedením tetrahedronizace na její duální strukturu vznikne Voronoiova mozaika (viz obr. 4). Jedná se o množinu buněk, jejichž stěny jsou umístěny kolmo na příslušnou stranu tetraedru s průsečíkem v jejím středu. Mozaika je dále „ořezána“ podle skutečného objemu modelovaného prvku. Objem buněk určuje velikost hmotnosti, kterou nesou jádra buňky - generované body. Stěny buněk vymezují velikost průřezové plochy pružiny, čili tuhost spojnice přilehlých bodů. Tímto způsobem je tak možné sestavit příhradovinu modelu včetně její hmotnosti a tuhosti.

Okrajové podmínky jsou definovány vždy na konkrétních bodech. Podpory jako omezení translace v požadovaném směru a zatížení jako přemístění bodu v čase. Přírůstek deformace je pak započítáván v každém výpočetním kroku. Velikost výpočetního kroku je především závislá na tuhosti modelu a je jedním z hlavních faktorů ovlivňujícím rychlost výpočtu.

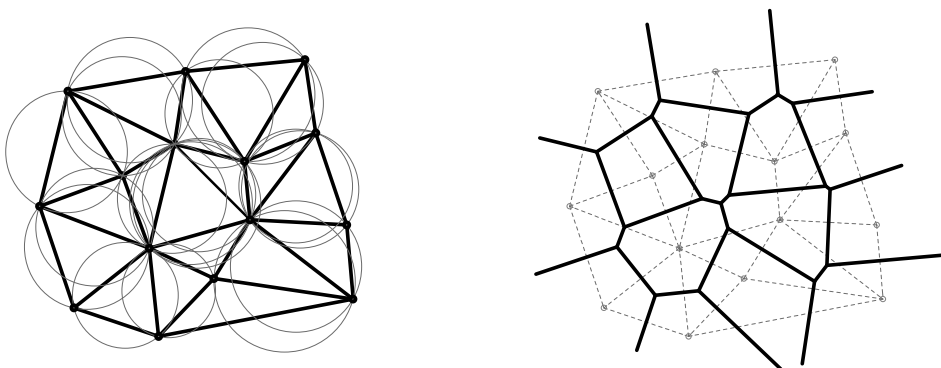
3 APLIKACE

Motivací pro modelování ocelového nosníku, byl výsledek experimentu na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební na VUT v Brně, viz obr. 1. Tento prvek byl zatěžován ve středu horní pásnice s celkovou vynucenou deformací 40 mm.

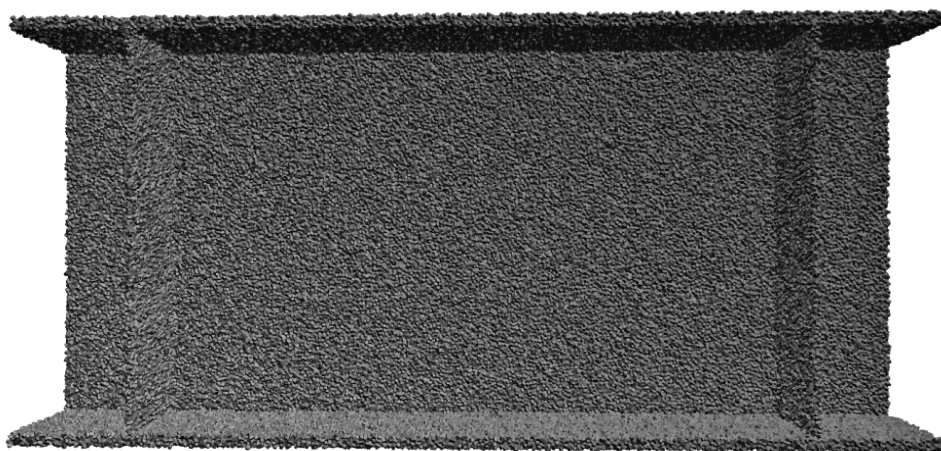
Podle zjištěných rozměrů nosníku (obr. 2) byla pro generování bodů zvolena minimální vzdálenost 2,5 mm, s okolím o tloušťce 6,5 mm. Tyto rozměry byly stanoveny s ohledem na minimální tloušťku stěny modelovaného objektu tak, aby ještě bylo možno vytvořit příhradovou strukturu, ale zároveň byl počet bodů co nejmenší. Přesto bylo vyžadováno vygenerování cca 650 tisíc bodů, které se následně po očištění objemu zredukovaly na asi 180 tisíc.



Obr. 2: Rozměry ocelového nosníku



Obr. 3: Vytváření Deloneho triangulace s legalizací pomocí opsaných kružnic – vlevo. Převedení pomocí středů opsaných kružnic na Voronoiovu mozaiku – vpravo.

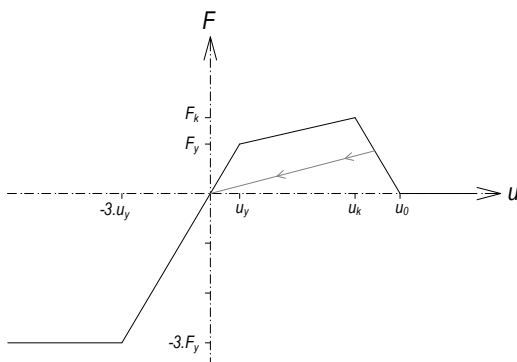


Obr. 4: Voronoiova mozaika

Deloneho tetrahedronizací a následnou Voronoiovou mozaikou se nad touto množinou vytvořila skupina translačních pružin. Silová funkce pružin byla zvolena jako polygonální a byla odvozena od pracovního diagramu oceli, viz obr. 5.

Síla F_y odpovídala pro pružinu plochy $A = 1 \text{ m}^2$ hodnotě 235 MN. Sklon první části tahové větve byl definován modulem pružnosti oceli 210 GPa. Následná větev pak relativní silou F_k

(360 MN) při relativním prodloužení $u_y = 0,01$. Poslední část klesala se sklonem odpovídající modulu pružnosti. Za ní byla pružina považována za přetrženou a již další sílu nepřenášela. Tlaková větev do hodnoty síly $-3F_y$ klesala ve sklonu modulu pružnosti. Následně došlo v tlaku k plastizaci pružiny a přenášená tlaková síla zůstávala na této maximální dosažené hodnotě.

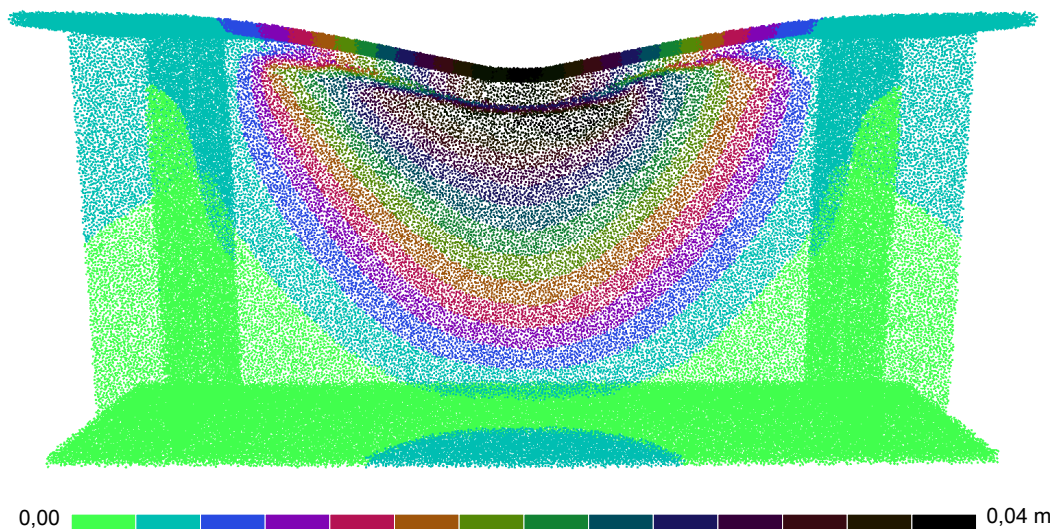


Obr. 5: Silová funkce translační pružiny

Konstrukce byla podepřena v místě pod oběma výztuhami a to 2 cm širokým pásem vetknutých bodů. Zatížení bylo realizováno vynuceným posuvem bodů v šířce 2 cm nacházejících se ve středu horní pásnice rychlostí 0,025 m/s do maximální deformace. Výpočetní krok vzhledem k tuhosti konstrukce měl velikost 10^{-7} s. Celkem bylo provedeno 16 milionů časových kroků.

4 VÝSLEDKY

Tvar nosníku se po deformaci velmi blíží tvaru získaného z experimentu, což nejlépe demonstruje obr. 6 a jeho srovnání s obr. 1, resp. 7. Absolutní posunutí bodů je barevně zvýrazněno. Maximální příčná deformace pod místem zatěžování činila při experimentu $40,0 \pm 1,0$ mm, zatímco u simulace $43,0 \pm 0,5$ mm a je zvýrazněna černou barvou.

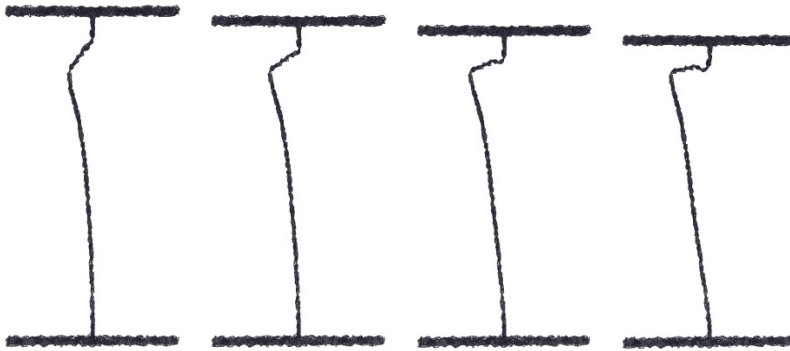


Obr. 6: Model po konečné deformaci

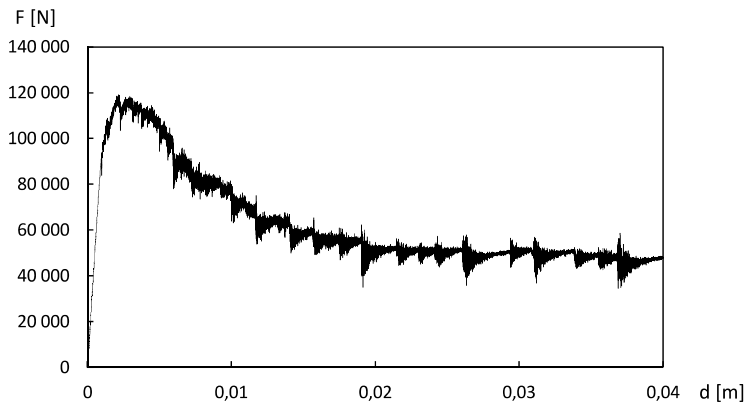
Obr. 7 ukazuje průběh zatěžování a je z něj patrná i značná štíhlost konstrukce. Poměrně ostré zlomy v deformaci modelované pásnice naznačují, že model je příliš hrubý a zřejmě by bylo vhodné zjemnit jeho strukturu alespoň v místě pásnice, tedy snížit minimální vzdálenost bodů pod 2,5 mm.



Obr. 7: Plastizace stojiny – výsledek experimentu



Obr. 8: Řez nosníku v místě zatěžování, zleva doprava s deformací 10 mm, 20 mm, 30 mm a 40 mm



Obr. 9: Zatěžovací diagram modelu

Pro dosažení únosného počtu výpočetních kroků musela být použita velká rychlost zatěžování. Při takové to rychlosti (0,005–0,1 m/s), docházelo často k náhlým porušením ve struktuře sítě a model byl tak více citlivý i na postup generování a minimální vzdálenosti bodů.

5 PARALELIZACE

Aplikace byla nejprve vytvořena na platformě x86 počteně jako jednovláknová a naprogramována v jazyce Java. Dosažený výkon ale výpočet podobně rozsáhlých modelů neumožňoval. Vzhledem ke struktuře aplikace, je ovšem možné ji paralelizovat. V jednotlivých časových krocích, jsou počítány aktuální stavové proměnné všech prvků, nejprve pružin a následně bodů. Tyto výpočty jsou prováděny pro každý prvek nezávisle a je možné je tak počítat současně.

Byla proto vytvořena verze pro platformu Nvidia CUDA, využívající potenciál GPU, konkrétně výpočetní karty Tesla C2050 a výpočet tak probíhal na 384 stream procesorech. Ve srovnání s Java verzí běžící na procesoru Intel Core i7-950 byl dosažen faktor zrychlení asi 90x. Při těchto parametrech proběhl popsáný výpočet za 32 hodin a 24 minut, tedy jeden výpočetní krok průměrně trval asi $7,29 \cdot 10^{-3}$ s.

Výpočetní potenciál platformy CUDA přitom nebyl v tomto případě zcela využit. Jelikož se jedná o paměťově náročnou aplikaci, výkon je brzděn latencemi paměťového subsystému. Částečným řešením by proto mohla být další důsledná optimalizace aplikace pro paměťový systém konkrétní karty, nebo využití novější zařízení s vylepšenou paměťovou správou.

6 ZÁVĚR

Použitý model na vizuální shodě výsledků s experimentem prokázal svoji funkčnost a je ho možné za určitých podmínek použít pro řešení podobných silně nelineárních úloh. Obecnost a v současné době stále malá zkušenost s modelem pro jeho širší využití vyžaduje další studium jeho parametrů a vztahů mezi nimi. S tím souvisí i výpočetní náročnost, kterou je možné jeho parametry ovlivnit. Současný trend paralelizace výpočtů, pro který je tato metoda vhodná, jistě v brzké době celý proces ještě více zpřístupní pro výpočty na běžně dostupném hardware.

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum byl realizován za finanční podpory VUT v Brně v rámci projektu specifického vysokoškolského výzkumu FAST-S-12-21/1653.

LITERATURA

- [1] BAŽANT, Z., M. TABBARA, M. KAZEMI a G. PIJAUDIER-CABOT. *Random Particle Model for Fracture of Aggregate or Fiber Composites*, (1990) J. Eng. Mech., 116(8), 1686–1705.
- [2] KAWAI, T. *New discrete models and their application to seismic response analysis of structures*. Nuclear Engineering and Design, Volume 48, Issue 1, June 1978, Pages 207–229.
- [3] FRANTÍK, P. *Dynamická simulace lomu tlačeneho vzorku*. Modelování v mechanice 2008, VŠB-TU Ostrava, Únor 2008, ISBN 978-80-248-1705-7.
- [4] FRANTÍK, P. *Diskrétní model FyDiK2D*, Modelování v mechanice 2009, VŠB-TU Ostrava, Květen 2009, ISBN 978-80-248-2016-3.
- [5] LEDOUX, H. *Computing the 3D Voronoi Diagram Robustly: An Easy Explanation*, 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD 2007), Published by the IEEE Computer Society, July 2007, ISBN 0-7695-2869-4.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Milan Moravčík PhD., Katedra stavebných konstrukcí a mostov, Stavebná fakulta, ŽU v Žilíně.

Doc. Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava.