



Národní konference s mezinárodní účastí  
**INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002**  
13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

## PARALLEL SOLUTION IN OPTIMIZATION OF REINFORCED CONCRETE BEAM DESIGN

Matěj Lepš<sup>\*</sup>, Zdeněk Bittnar<sup>+</sup>

**Summary:** One of the main requests in engineering practice is to have an effective design procedure of a reinforced concrete continuous beam. This task is a multidimensional and multimodal optimization problem. Our effort is to prove the reliability and efficiency of stochastic optimization methods in this area. A parallel version of the genetic algorithm based strategy, called the augmented simulated annealing method, can solve the proposed problem. Preliminary results show a possibility of new developments in this research.

**Key words:** genetic algorithm, parallel computers, reinforced concrete, design, continuous beam, optimization.

### 1 Úvod

Hlavním úkolem stavebního inženýra v projekci je takový návrh konstrukce, aby výsledná stavba vyhovovala požadovaným kritériím jako jsou například podmínky spolehlivosti, funkčnosti či výsledný estetický dojem. V současné době je snaha tradiční postupy v této oblasti zautomatizovat, aby se minimalizovala pravděpodobnost numerických chyb a současně maximalizovalo využití kreativity a zkušeností projektanta. Při vývoji potřebných programů je možné vycházet z po desetiletí známých postupů nebo se lze dívat na návrh z pohledu numerických optimalizací. Do druhého postupu patří užití stochastických optimalizačních metod. Množství vycházejících článků a aplikací v zahraničí v posledních letech naznačuje nutnost zavedení takovýchto postupů do výzkumu a praxe i u nás. V minulém roce bylo na našem pracovišti odzkoušeno několik algoritmů ze zmíněné oblasti. Výsledky ukazují, že je zde množství algoritmů, které se dají na danou úlohu použít [4]. Paralelní verze jedné z metod, konkrétně metody rozšířeného simulovaného žíhání [5,7], by měla prezentovanému postupu přinést větší spolehlivost a zvýšit šance na jeho začlenění do praxe. Všeobecný cíl paralelizace směřuje jak do oblasti úspory času, tak i do oblasti využití narůstajícího výkonu osobních počítačů nejen v projekčních kancelářích. V současné době levné a rychlé síťové propojení umožňuje adekvátní vyplnění v průměru nevytížených procesorů. Získané předběžné výsledky naznačují cestu, kudy se pravděpodobně bude další výzkum nadále ubírat. Následující část článku je věnována zvolenému modelu železobetonového nosníku. Další kapitola stručně popisuje použitý optimalizační

---

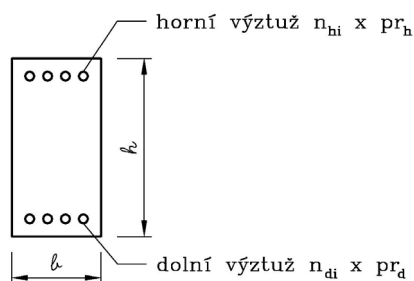
<sup>\*</sup> Ing. Matěj Lepš, Katedra stavební mechaniky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29, Praha 6; tel. +420 2 2435 4472, e-mail: matej.leps@fsv.cvut.cz

<sup>+</sup> Prof. Zdeněk Bittnar, DrSc., Katedra stavební mechaniky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29, Praha 6; tel. +420 2 2435 3869, e-mail: bittnar@fsv.cvut.cz

algoritmus. Stručné informace o paralelní verzi jsou spojeny s prezentací výsledků a nastíněním výhledů do budoucnosti.

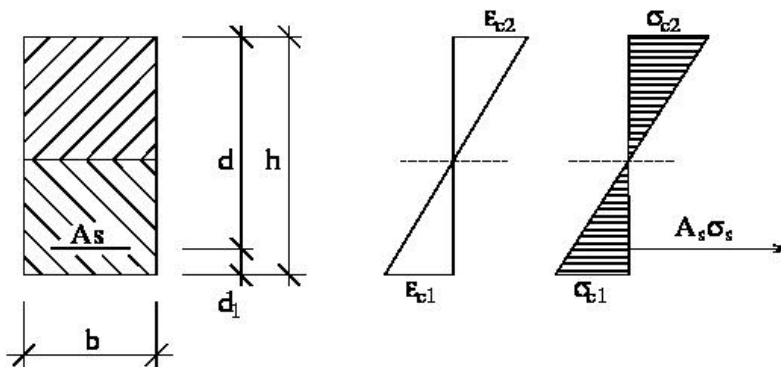
## 2 Model železobetonového spojitého nosníku

Nalezení vhodného modelu je základní kámen každého programu. Model musí být na jedné straně dostatečně výstižný, aby byl schopen postihnout reálné chování konstrukce, a na druhé straně natolik jednoduchý, aby jeho implementace byla realizovatelná. V železobetonu máme dva základní materiály, jejichž chování musíme namodelovat: betonový průřez, v našem případě jsme se zaměřili pouze na obdélníkový tvar, a ocelovou výztuž. Ta je modelována obdobně jako v [3] jedním typem profilu pro ohybovou výztuž u dolních vláken betonového průřezu, druhým typem profilu u horních vláken a třetím typem pro smykovou výztuž (Obr. 1).



Obr. 1 Řez železobetonovým nosníkem

Z důvodu zjednodušení byl nosníkový úsek mezi dvěma podporami rozdělen na tři dimenzační části, ve kterých je shodný počet výztužných prutů. Obdobný systém byl zvolen pro smykovou výztuž. Navíc, pro přiblížení výsledků k praxi, jsou rozměry jednotlivých částí a celků konstrukce odstupňovány po 25 mm. V této chvíli je kompletně nadefinovaný tvar konstrukce. Pro modelování chování a následné posouzení odezvy konstrukce je použita norma EUROCODE 2 [9]. V prvním mezním stavu je uvažován ohýbaný prvek s parabolicko-rectangulárním rozdělením tlakového napětí v betonu a příhradová analogie pro smykový prvek. Pro druhý mezní stav je použit průřez s lineárním napětím v betonu (Obr. 2), kde se neuvažuje napětí v tažené části betonu po překročení tahové únosnosti (vzniku trhliny).

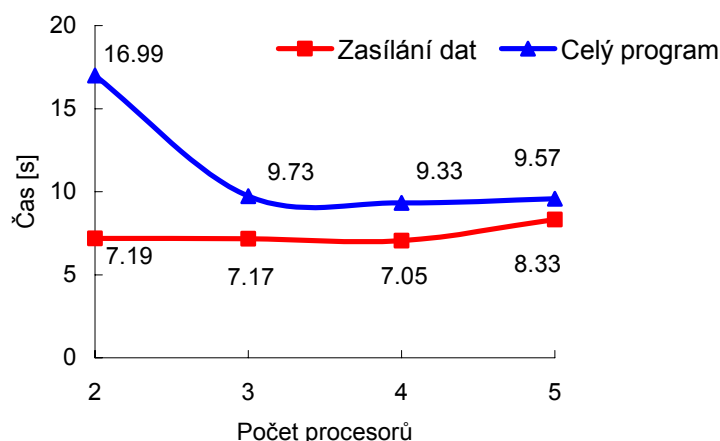


Obr. 2 Model pro druhý mezní stav před vznikem trhliny

Mezní stav únosnosti je kontrolován ohybovou kapacitou průřezu vyjádřenou v mezních momentech, smyková únosnost je kontrolována mezními silami – podrobnosti např. v [9]. Mezní stav použitelnosti je garantován splněním podmínky pro limitní průhyb konstrukce, který v případě spojitého nosníku nesmí překročit jednu dvěstěpadesátinu rozpětí. Podrobný postup začlenění těchto podmínek lze nalézt např. v [6]. Dalším zvoleným omezením je šířka trhlin, kterou jsme neposuzovali, ale začlenili jsme ji do optimalizačního procesu [1]. V našem případě se tak snažíme minimalizovat kladný rozdíl mezi skutečným napětím, které vznikne v krajních vláknech, a mezní tahovou únosností betonu

$$\Delta\sigma = \sigma_{c1} - f_{ctm}, \quad \sigma_{c1} = \frac{M_{Sk}(h - a_{gi})}{I_i},$$

kde  $M_{Sk}$  je působící ohybový moment,  $h$  je výška průřezu,  $a_{gi}$  je vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horních vláken a  $I_i$  je moment setrvačnosti ideálního průřezu. Pro porovnání více rozdílných variant při řešení celé úlohy byla zvolena cena konstrukce. Finanční ohodnocení vychází z ceny objemu betonu, z hmotnosti oceli a zejména z ceny vynaložené na bednění. Proto cesta k optimální konstrukci povede minimalizováním těchto složek.



Obr. 3 Výsledky paralelní verze optimalizace, trojúhelníčky jsou vykresleny časy celého programu, čtverečkovaně časy spotřebované na posílání dat

### 3 Rozšířené simulované žihání

Použitá optimalizační metoda IASA (z angl. Integer Augmented Simulated Annealing- celočíselné rozšířené simulované žihání) vychází z principu genetických algoritmů [2], které nekladou požadavky na optimalizovanou funkci jako je spojitost, derivovatelnost apod. Fungují pouze na základě znalosti funkční hodnoty. Řadí se do skupiny stochastických algoritmů, které k vyhledání optima využívají náhodných operátorů. Vyskytují se zde prvky okopírované z chování živých organismů – konkrétně je zde *populace* jedinců, přičemž každý reprezentuje jedno řešení daného problému. V závislosti na své úspěšnosti je jedinec vybírán do procesu *křížení* nebo podléhá operaci *mutace*. Vznikají tak noví jedinci, kteří dědí dobré vlastnosti svých předchůdců a méně úspěšní jedinci v průběhu algoritmu umírají. Tento cyklus se iteračně opakuje, dokud není splněno některé z požadovaných kritérií – obvykle maximální počet cyklů - *generací*. Novým prvkem oproti standardnímu genetickému algoritmu je, že do procesu

zařazení nově vzniklých jedinců do populace byl přijat princip simulovaného žihání [7] umožňující zpomalení konvergence a tím i „hrubé“ ošetření pádu do lokálního minima. Druhý pohled na simulované žihání spočívá v principu hledání rovnovážného stavu soustavy za neustálého snižování teploty, což by mělo při vhodném schématu ochlazování vést celkový stav soustavy do globálního minima. Detailní popis této metody lze nalézt např. v [8].

#### 4 Paralelizace algoritmu a závěry

Princip paralelního optimalizačního procesu je ve stručnosti následující: optimalizační metoda vytvoří dle daných kritérií množinu přípustných konstrukcí a na základě požadavků a ohodnocení se snaží najít „optimální“ řešení. Tento proces je iterační. Výsledkem je, že počet analýz a ohodnocení konstrukcí jde do statisíců. Zde lze s výhodou využít implicitní paralelizace genetického algoritmu [7]. Ta spočívá v možnosti rozdělení problému na část řídicí, tedy na optimalizační algoritmus a na část podřízenou, tedy spočtení a ohodnocení konstrukce. Takto rozdělený problém se následně přesune na různé procesory v počítačové síti.

První výsledky získané pomocí paralelní knihovny MPI (Message Passing Interface) na 16 procesorovém počítači SUN HPC 3500 Ultra SPARC-II jsou vykresleny na Obr. 3. Jak je patrné, optimální efektivity, tzv. load-balancing, nebylo dosaženo z důvodu velkého množství předávaných informací. Čas strávený komunikací je v tomto případě větší než doba věnovaná samotnému výpočtu. Přitom optimálnímu stavu odpovídá opačný poměr časů.

Proto je nyní připravován nový model železobetonového nosníku, který by měl snížit množství předávaných informací. Ten spočívá v dekompozici analýzy konstrukce na dimenzaci jednotlivých průřezů a na optimalizaci konstrukce jako celku. Cíl první části je návrh železobetonového průřezu tak, aby interakční diagram pokryl namáhání všemi zatěžovacími stavy. Rychlá a efektivní metoda na výpočet vnitřních sil obecného průřezu byla navržena v [10]. Návrh příčného řezu lze pak převést na neomezený nelineární problém, který je již řešitelný běžnými postupy. Druhým krokem je implementace nově připravovaného programu na metodu konečných prvků, který je vyvíjen na Katedře stavební mechaniky, Fakulty stavební ČVUT v Praze. Tento krok rozšíří možnosti programu o vhodnější materiálové modely a podrobnější analýzu deformací. Na druhou, tedy optimalizační část, pak zbývá pouze změna diskretních charakteristik, jako jsou např. rozměry příčného řezu či typ materiálu. Takto formulovaná úloha je daleko lépe řešitelná nastíněnou metodou rozšířeného simulovaného žihání, než v prezentovaném případě. Výše uvedené kroky se též projeví na zvýšené náročnosti optimalizované funkce a tím i na další možnosti plného využití paralelního prostředí.

Tato práce je podporována Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy pod číslem projektu MŠMT 210000003, grantem FRVŠ číslo 2078/2002 a grantem Evropské komise – grant TMR číslo ERB FMGE CT950051 (TRACS Training and Research Programme at EPCC).

#### Literatura

- [1] Bittnar, Z., Lepš, M., Smutek, M.: Optimalizace návrhu ŽB nosníku s ohledem na šířku trhlin, *Betonářské dny 2001*, Česká betonářská společnost ČSSI, Pardubice, s. 309-313, 2001

- [2] Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, *Addison-Wesley*, 1989
- [3] Koumousis, V. K., Arsenis, S. J., Vasiloglou, V. B.: Detailed design of reinforced concrete buildings using logic programming, *Advances in Engineering Software*, Volume 25, s. 161-176, 1996
- [4] Hrstka, O., Kučerová, A., Lepš, M., Zeman, J.: A competitive comparison of different types of evolutionary algorithms, in *Proceedings of the Sixth International Conference of Artificial Intelligence to Civil and Structural Engineering*, Civil-Comp Press, 2001
- [5] Lepš, M.: Optimalizace železobetonových konstrukcí, 3. odborný seminář doktorského studia, s. 69-72, Brno, 2001
- [6] Lepš, M., Bittnar, Z.: Optimization of RC beams using genetic algorithms, in *Proceedings of International Conference on Computational Engineering & Sciences*, Puerto Vallarta, 2001
- [7] Mahfoud, S., Goldberg, D. E.: A genetic algorithm for parallel simulated annealing, in Manner, R. and Manderick, B., (Editors), *Parallel Problem Solving from Nature*, Volume 2, 1992
- [8] Matouš, K., Lepš, M., Zeman, J., Šejnoha, M.: Applying genetic algorithms to selected topics commonly encountered in engineering practise, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 190, Issues 13-14, s. 1629-1650, 2000
- [9] Procházka, J.: EUROCODE 2, *výtah z ČSN P ENV 1992-1-1 s komentářem*, PROCON, 1995
- [10] Vondráček, R.: Numerical methods in nonlinear concrete design, *Diplomová práce*, ČVUT, 2001