

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

307 630

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

G06F 17/50 (2006.01)

F16B 31/00 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2014-249**
(22) Přihlášeno: **14.04.2014**
(40) Zveřejněno: **21.10.2015**
(Věstník č. 42/2015)
(47) Uděleno: **12.12.2018**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **23.01.2019**
(Věstník č. 4/2019)

(56) Relevantní dokumenty:
Počítačový program SolidWorks, Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, a Dassault Systèmes S.A. company, 1995-2010.
EP 2490140 A; DE 102012210084 A; EP 1063061 B.

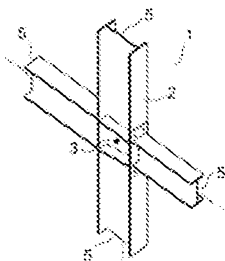
(73) Majitel patentu:
IDEA StatiCa s.r.o., Brno, Královo Pole, CZ

(72) Původce:
Ing. Lubomír Šabatka, CSc., Brno, CZ
Ing. Jaromír Kabeláč, Brno, CZ
Drahošlav Kolaja, Brno, CZ
Martin Pospíšil, Brno, CZ

(74) Zástupce:
PatentEnter, Ing. Michal Jordán, Koliště 13a,
602 00 Brno

(54) Název vynálezu:
**Počítačově realizovaný způsob simulace
reálného chování šroubového spojení
kovových komponentů stavební konstrukce**

(57) Anotace:
Vynález se týká simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů s využitím metody konečných prvků, pro určení vhodných součástí styčnicku stavební konstrukce, jejich uspořádání a ke stanovení jejich parametrů, přičemž využívá nelineární modely pro simulaci kontaktu mezi deskami, smykového namáhání šroubového spojení a axiálního namáhání šroubového spojení.



CZ 307630 B6

Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce

5 Oblast techniky

Předkládaný vynález se týká simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů s využitím metody konečných prvků, pro určení vhodných součástí styčnicku stavební konstrukce, jejich uspořádání a ke stanovení jejich parametrů.

10

Dosavadní stav techniky

Moderní výpočetní technika umožňuje při návrhu, vývoji a konstrukci v různých oblastech techniky využít počítačově realizovanou simulaci pro predikci skutečného chování tam, kde praktické ověření není možné nebo je z určitých, například časových či finančních důvodů nevhodné. Jako příklad lze uvést patent EP 1257904, popisující počítačově realizovanou metodu pro simulaci působení 1/f šumu na elektrický obvod nebo způsob simulace lisování plechu s využitím metody konečných prvků pro stanovení optimálního tlaku při tváření plechu pomocí lisovacích forem, popsány v patentové přihlášce EP 2423840. Příkladem ze stavebnictví může být metoda pro vytvoření modelu simulujícího těleso, které v sobě zahrnuje pruty pro zpevnění z dokumentu KR 100911167.

Takovéto simulace obvykle předcházejí fyzické produkci a to například výrobě prototypu nebo produkci samotného výrobku, jako je tomu právě u stavebních konstrukcí, kdy simulace obvykle předchází každé nové výstavbě. Využívání takovýchto simulací může velmi snížit investice na vývoj, testování a výrobu a také zvýšit spolehlivost a kvalitu daných produktů, což je přímý technický efekt, který takovéto vynálezy mají. V případě stavebních konstrukcí jsou to především právě snížení výrobních nákladů úsporou materiálu či množství komponentů, snížení času potřebného k vývoji a omezení nebo úplné vyloučení potřeby testů a zkoušek. Dalším významným přínosem je zajištění vyšší bezpečnosti staveb a snížení rizika konstrukčních vad.

Kovové nosné konstrukce jsou významnou částí budov, mostů, skladových objektů a dalších stavebních konstrukcí. Z technologických důvodů jsou prvky kovových stavebních konstrukcí prutové. Prutový prvek má charakter tyče určitého průřezu. Při návrhu nosné konstrukce musí stavební inženýr navrhnout konstrukci tak, aby přenesla zatížení, které na konstrukci působí. Dle stavu techniky se toho dosahuje tak, že se sestaví prutový výpočtový model celé konstrukce zpravidla metodou konečných prvků. Jak je zřejmé osobě znalé oblasti techniky například z literatury K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, New Jersey, 1996 nebo O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*, Sixth edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005. Tyčové prvky se modelují jako jednodimenzionální, tedy liniové konečné prvkové elementy. Místa, v nichž jsou tyčové prvky spojeny, se nazývají styčníky a jsou v prutovém modelu simulovány nehmotnými uzly. Po sestavení takového modelu se matematicky simulují posuny a pootočení styčnicků a z nich následně napětí a vnitřní síly v prutech konstrukce. Potřebné rozměry průřezu tyčových prvků jsou tak stanoveny na základě této simulace.

Následně stavební inženýr přistoupí k navržení a ověření bezpečnosti styčnicků. Do styčnicku je většinou připojeno více prutových prvků. Výjimku tvoří styčník, kde je konstrukce připojena k základové nebo jiné konstrukci. V takovém případě může být připojen ke styčnicku pouze jeden prutový prvek. Z prutového modelu jsou známy koncové síly, kterými prutový prvek působí na styčník. Ve styčnicku je nutno vyřešit přenos těchto sil, vzájemné propojení prutových prvků, jejich kolize a interakce. Styčník tak představuje poměrně složitý podsystém a na jeho správném návrhu často závisí bezpečnost celé konstrukce. Prutový model sám o sobě řešení styčnicku

neumožňuje. Liniové konečně prvkové elementy nejsou schopny postihnout skutečné chování styčnicku.

5 Styčnický kovových konstrukcí se dle stavu techniky řeší pomocí návrhových metod, založených na vzorcích, které jsou odvozeny jen pro vybrané typy styčnicků a vybrané typy namáhání jak je uvedeno například v ČSN EN 1993-1-8: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčnicků. Pro simulaci chování libovolného či netypického styčnicku je potřeba sestavit výstižnější výpočtový model, který bude zahrnovat působení veškerých obsažených komponentů, kterými jsou jednotlivé prutové prvky, například různé výztuže a jejich spojení
10 pomocí svarů či šroubů.

Toto lze teoreticky realizovat pomocí úplného trojrozměrného konečně prvkového modelu, který ovšem není kvůli vysoké výpočtové a tudíž i časové náročnosti prakticky proveditelný pro konstrukce zahrnující množství propojených součástí.

15 Další možností je zjednodušení na dvoudimensionální skořepinové konečně prvkové elementy, které budou vzájemně propojeny pomocí uzlů sítě konečných prvků společných několika elementům. Alternativně lze pro simulaci spojení využít interpolačních vazeb, které zajistí přenesení parametrů z uzlů jednoho elementu na uzly druhého elementu a to bez jejich propojení
20 společnými uzly, jak je také detailně popsáno v literatuře citované výše a zmíněno v příkladech uskutečnění vynálezu. Ani jedním z uvedených způsobů ovšem nelze vhodně modelovat množství šroubových spojení, která se vyznačují řadou složitých nelineárních vlastností. Právě šroubová spojení jsou přitom u kovových stavebních konstrukcí vůbec nejpoužívanější.

25 Podstata vynálezu

Uvedené nedostatky odstraňuje počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce zahrnující nahrazení kovových
30 komponentů stavební konstrukce tvarově jednoduššími deskami skořepinových elementů modelovanými pomocí metody konečných prvků tak, že desky zahrnují množství prvků k sobě vázaných uzly, přičemž je zahrnuta první deska obsahující alespoň dva první uzly a druhá deska obsahující alespoň dva druhé uzly, přičemž způsob zahrnuje model pro simulaci kontaktu mezi deskami, podle vynálezu, jehož podstata spočívá v tom, že způsob dále zahrnuje model pro
35 simulaci smykového namáhání šroubového spojení a model pro simulaci axiálního namáhání šroubového spojení, pro přenos silového a deformačního zatížení z prvních uzlů na druhé uzly, přičemž model pro simulaci smykového namáhání šroubového spojení je nelineární.

40 Další přednosti a výhody tohoto vynálezu budou zřejmé po důkladném přečtení příkladů uskutečnění vynálezu s odpovídajícími odkazy na průvodní obrázky.

Objasnění výkresů

45 Obr. 1 je příklad styčnicku

Obr. 2 je příklad krátkého segmentu z prutového prvku

Obr. 3 ilustruje modelování přenosu zatížení ze šroubu na desku

50 Obr. 4 je příklad průběhu deformace a síly u předepjatého spoje

Obr. 5 ilustruje axiální namáhání šroubového spoje

55 Obr. 6 ilustruje subsystém otlacení dřívku do desky

Obr. 7 ilustruje smykové namáhání šroubového spoje

Obr. 8 je příklad výsledné nelineární závislosti deformace na síle u smykového modelu

5

Příklady uskutečnění vynálezu

Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce podle vynálezu vychází z toho, že styčník 1 s částmi připojených prutových prvků 2 bude vyjmut z prutového modelu celé konstrukce, jak je znázorněno na obr. 1. Pouze v případě připojení k základu nebo jiné konstrukci může styčník 1 obsahovat kromě jiných komponentů pouze jeden prutový prvek 2. Z jednotlivých připojených prutových prvků 2 budou do modelu vloženy jen krátké segmenty, například o délce dvou až tří výšek jejich průřezů. Každý segment přebírá z celkového modelu směr, průřez a také zatížení. Celkové zatížení styčníku 1 vytváří rovnovážnou soustavu sil a momentů. Pro zatížení jednotlivých segmentů se použijí síly spočítané v místě připojení prutových prvků 2 ke styčníku 1, tedy v uzlu 3 prutového modelu celé konstrukce. Výpočtový model segmentu se nyní sestaví z desek 4 dvoudimensionálních skořepinových elementů s využitím metody konečných prvků a to podle tvaru průřezu a střednice segmentu představující přímku vedoucí těžištěm jeho průřezu. Pro vystižení správného chování styčníku je potřeba síly spočítané v uzlu 3 prutového modelu přenést na koncové řezy 5 segmentů na druhé straně od středu styčníku. To se provede tak, že uzel 3 prutového modelu, kde jsou známy vnitřní síly, se těmito silami zatíží a propojí silovými interpolačními vazbami se všemi uzly na hranách desek 4 segmentu na jeho koncovém řezu 5, což je znázorněno na obr. 2.

Interpolačních vazeb, anglicky Multi Point Constrain, se využívá pro vzájemné spojení více uzlů konečných prvků. Na základě vzájemné polohy spojovaných uzlů a znalosti interpolace deformace po konečné prvkové síti lze sestavit kinematické závislosti vzájemné deformace uzlů. Tyto závislosti lze vyjádřit lineární soustavou rovnic.

30

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{p}$$

Kde B je matice kinematických vztahů mezi uzly a u je vektor deformací vázaných uzlů. Tyto přebytké rovnice se zahrnou pomocí metody Lagrangeových multiplikátorů λ do energetického funkcionálu modelu konečných prvků.

35

$$\Pi = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{F} + \lambda^T (\mathbf{B} \cdot \mathbf{u} - \mathbf{p})$$

Kde K je matice tuhosti soustavy a F je vektor vnějších zatížení. Minimalizací funkcionálu $\delta \Pi = 0$ se získají výsledné hledané deformace u. Tyto detaily jsou ovšem zřejmé odborníkovi znalému oblasti techniky.

40

V celkovém prutovém modelu, v němž je spojení realizováno v nehmotném uzlu, jednotlivé segmenty navzájem kolidují a pronikají se. Proto je při tvorbě styčnickového modelu nutno příslušné desky 4 ořezat podle skutečného tvaru styčníku 1. Do styčníku 1 se kromě samotných prutových prvků 2 z konstrukčních a výrobních důvodů běžně připojují další komponenty jako například čelní desky, patní desky a plechy pro připojení příhradových prvků, dále příčné a podélné výztuhy či žebra. Ve styčnickovém modelu metody konečných prvků se proto tyto komponenty také zahrnou a budou obdobně nahrazeny dvojdimenzionálními deskami 4. Každá deska je tak tvořena sítí čtyřúhelníkových nebo trojúhelníkových prvků, jejichž vrcholy se stýkají v uzlech 3.

50

Jednotlivé desky 4 segmentů i přídatných plechů jsou v reálné konstrukci propojeny. To může být realizováno například nerozebíratelnými spoji v podobě svarů a částečně rozebíratelnými spoji v podobě šroubů nebo připevněním k základové konstrukci pomocí kotevních šroubů. Vzhledem ke známým metodám, které uspokojivě řeší svary i kotevní šrouby, bude dále detailně popsán pouze model šroubového spojení kovových komponentů.

Dle předkládaného způsobu samotné desky 4 propojeny nejsou, což znamená, že žádné uzly 3 jejich sítí nejsou společné. Pro vytvoření modelu styčnicku je pak nutné vytvořit model šroubového spojení mezi deskami 4. Šroubový spoj je rozdělen do tří částí. Na dvě propojení desky 4 s modelem šroubu a model šroubu jako takový.

Při modelování přenosu zatížení ze šroubu na desku 4 se vyjde z předpokladu, že zatížení přenášené šroubem se nepřenáší bodově, ale v určité oblasti. Toto lze modelovat jako náhradní spojitě zatížení 6 $p(x,y)$ na určité ploše 7 A odpovídající velikosti hlavy šroubu nebo podložky šroubu, jak je znázorněno na obr. 3. Výslednice tohoto spojitěho zatížení je shodná s přenášeným silovým zatížením přes šroub. Což lze zapsat:

$$F_S = \iint_A p(x, y).dA$$

Zároveň pro spojitě zatížení 6 musí platit momentová rovnováha. Je-li počátek 8 souřadné soustavy x,y desky umístěn v bodě spojení, pak musí platit:

$$0 = \iint_A x.p(x, y).dA, \quad 0 = \iint_A y.p(x, y).dA$$

Spojitě zatížení 6 se rozpočte do uzlů sítě na náhradní zatížení F_{Ni} pomocí báze funkcí $N_i(x,y)$ elementu konečných prvků.

$$F_{Ni} = \iint_A N_i(x, y).p(x, y).dA$$

Zavedeme-li předpoklad že spojitě zatížení 6 je lineárním násobkem celkového zatížení F_S a tvarové funkce $g(x,y)$ popisující tvar spojitěho zatížení.

$$p(x, y) = F_S.g(x, y)$$

Potom platí:

$$F_{Ni} = F_S \cdot \iint_A N_i(x, y).g(x, y).dA = F_S.B_i$$

Rozpočet zatížení ze šroubu do sítě lze zapsat maticově.

$$\mathbf{F}_N = \mathbf{B}^T.F_S$$

V dalším postupu se s výhodou využije Lagrangeových multiplikátorů. Nejprve se vyjádří energie sil této vazby. Přidá se deformační souřadnice představující deformaci bodu připojení šroubu u_s . V rovnici u značí vektor deformací v uzlech sítě desky. Dále platí:

$$E = F_S(\mathbf{B}.u - u_s)$$

Tato energie se přidá do energetického funkcionálu modelu konečných prvků.

$$\Pi = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{F} + F_s (\mathbf{B} \mathbf{u} - u_s)$$

- 5 Kde $\mathbf{K}$ je matice tuhosti soustavy a $\mathbf{F}$ je vektor vnějších zatížení. Minimalizací funkcionálu se získají výsledné hledané deformace $\mathbf{u}$. Podmínka minima funkcionálu je splněna pouze tehdy, bude-li platit:

$$\mathbf{B} \mathbf{u} = u_s$$

10

Toto je hledaný vztah mezi deformací bodu připojení šroubu a deformacemi uzlů sítě desky.

Při vyčíslení B_i je potřeba spočítat integrál:

15

$$B_i = \iint_A N_i(x, y) \cdot g(x, y) \cdot dA$$

- Po získání přepisu pro deformaci bodu připojení šroubu do desky 4 lze přistoupit k samotnému modelu šroubu. Z hlediska šroubu se rozlišuje axiální namáhání šroubu a smykové namáhání šroubu. Pro každé z těchto dvou namáhání se definuje závislost mezi relativními deformacemi bodů připojení šroubu a složkami zatížení přenášenými šroubem.

- Axiální namáhání šroubu se uvažuje elastoplastické. Velká část šroubových spojů je v praxi předepjatá z důvodu příznivějšího chování předepjatého spoje, jak je znázorněno na obr. 4 ilustrujícího průběh deformace 9 a síly 10. V modelu je třeba stanovit korektní tuhost spoje. Axiální tuhost šroubu je získána z materiálových vlastností a rozměrů šroubu. Jak je zřejmé z obr. 5, šroubový spoj se skládá z tahové větve, tvořené samotným šroubem 11 a tlakové větve, tvořené náhradním tlakovým tělesem 12. Na základě rozměrů a materiálových vlastností lze stanovit přímo tuhosti v tahové větvi a tuhosti v tlakové větvi.

- 30 Smykové namáhání šroubovým spojem je přenášeno dvěma mechanismy. Buďto třením mezi deskami 4 u předepjatého spoje nebo přes šroub. V prvním případě se obvykle model pro simulaci smykového namáhání šroubového spojení do celkového modelu nezařadí, i když lze využít i kombinaci obou těchto modelů.

- 35 Model pro simulaci kontaktu mezi deskami 4 z hlediska geometrie sítě vychází v některých případech ze zajištění koincidence sítě, neboli ze stavu, kdy jsou uzly sítě obou desek 4 přímo naproti sobě. V tomto případě se řeší pouze kontakt dvou uzlů. V případech jiných jsou sítě desek 4 v různých polohách. Pak se model řeší vzájemnou penetrací ploch, čímž se převede v rámci metody konečných prvků problém kontaktu dvou ploch na problém kontaktu dvou uzlů, jak je zřejmé osobě znalé oblasti techniky. Ve všech případech je princip zajištění vazby shodný. Dojde-li k penetraci g kontaktních ploch, je třeba zavést do těchto uzlů kontaktní sílu λ_k , aby došlo k minimalizaci penetrace g na přijatelnou hodnotu. Kontaktní úloha je nelineární a v rámci metody konečných prvků se řeší iteračními přístupy. Jedním ze tří základních iteračních postupů je tzv. penalizační funkce. Dojde-li k penetraci, potom se mezi kontaktní uzly zavede velká penalizační tuhost k , která vyvolá kontaktní sílu mezi uzly.

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_m \\ dx_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -kg \\ kg \end{bmatrix}$$

- 50 Dalším iteračním postupem je využití Lagrangeova multiplikátoru. Dojde-li k penetraci, předepíše se mezi kontaktní uzly kinematická vazba, která vzájemně váže jejich pohyb jako

pohyb tuhého tělesa. Zde se využije metody Lagrangeových multiplikátorů, kdy se zavede další hledaný neznámý parametr λ_k , který představuje hledanou kontaktní sílu. Následující iterační předpis minimalizuje penetraci g k nule.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_m \\ dx_c \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda \\ \lambda \\ g \end{bmatrix}$$

Posledním iteračním postupem je rozšířený Lagrangeův multiplikátor, který kombinuje výhody obou výše uvedených přístupů. Nezavádí do soustavy rovnic další neznámý parametr λ_k a minimalizuje penetraci g k nule. Použije se penalizační tuhost k jiným předpisem iterace.

10

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_m \\ dx_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda - kg \\ \lambda + kg \end{bmatrix}$$

Následující hodnota λ_k pro další iterační krok se spočte následovně:

15

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + kg$$

V druhém případě je smykové namáhání přenášeno přes šroub. Přitom se model smykového namáhání šroubu rozdělí na tři lineárně řazené subsystémy. Subsystém otláčení dříku do desky na obr. 6, který je obsažen dvakrát pro simulaci interakce s každou ze dvou desek a subsystém smykové deformace šroubu na obr. 7. V případě spojování většího množství desek 4 bude obsaženo i více subsystémů otláčení dříku do desky. Tyto subsystémy jsou obecně nelineární a jsou dány rozměry a materiálovými charakteristikami šroubu a desek.

Model otláčení dříku do desky je detailně znázorněn na obr. 6, kde je zřejmé lokální otláčení dříku šroubu do spojované desky. V tomto modelu je dřík šroubu 13 simulován jako tuhý kontaktní element a deska 4 je modelována pomocí elementů pro rovinou napjatost. Materiál desky 4 je uvažován ideálně plastický. Řešením takto postaveného modelu se získá hledaná nelineární závislost deformace 9 na síle 10.

Model smykové deformace šroubu je dán kombinací ohybového a smykového namáhání, jak je znázorněno na obr. 7. Na základě znalosti rozměrů šroubu a jeho materiálových vlastností a dále průběhu posouvající síly 14 a momentu se stanoví závislost deformace 9 na síle 10 šroubu také jako nelineární.

Celková smyková charakteristika se stanoví jako celková charakteristika tří sériově řazených nelineárních subsystémů, z nichž dvě představují modely otláčení dříku do desky a jedna model smykové deformace šroubu. Na obr. 8 je uveden příklad takové výsledné nelineární závislosti deformace 9 na síle 10.

Model pro simulaci smykového namáhání šroubového spojení, model pro simulaci axiálního namáhání šroubového spojení a model pro simulaci kontaktu mezi deskami mohou být realizovány pomocí jednoho celkového modelu nebo mohou být rozděleny na množství parciálních modelů řešících jednotlivé fyzikální jevy nebo jejich části.

Po sestavení výpočtového modelu výše uvedeným způsobem se provede standardní nelineární výpočet metodou konečných prvků, který je díky výše popsanému způsobu velmi rychlý. Výsledkem jsou posuny a pootočení všech uzlů sítě. Z těch jsou dopočítána napětí ve všech kovových komponentech, dále například napětí ve svarech, síly ve šroubech a kotevních

šroubech a kontaktní napětí mezi deskami a betonovými kotevními konstrukcemi. Tyto výsledky se dále použijí například pro bezpečný návrh dimenzí jednotlivých desek, svarů a šroubů.

5

PATENTOVÉ NÁROKY

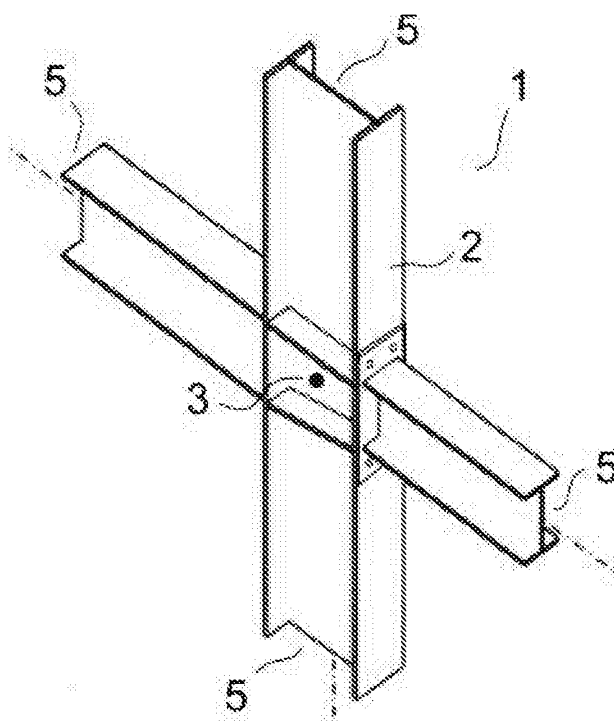
1. Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce zahrnující první krok nahrazení kovových komponentů stavební konstrukce tvarově jednoduššími deskami (4) skořepinových elementů modelovanými pomocí metody konečných prvků tak, že desky (4) zahrnují množství prvků k sobě vázaných uzly, přičemž je zahrnuta první deska (4) obsahující alespoň dva první uzly a druhá deska (4) obsahující alespoň dva druhé uzly a dále zahrnující druhý krok simulace přenosu silového a deformačního zatížení z prvních uzlů na druhé uzly, **vyznačující se tím**, že krok simulace přenosu silového a deformačního zatížení je realizován modelem pro simulaci smykového namáhání šroubového spojení a modelem pro simulaci axiálního namáhání šroubového spojení, přičemž model pro simulaci smykového namáhání šroubového spojení je nelineární.
2. Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že model pro simulaci smykového namáhání šroubového spojení obsahuje matematický model jednoho nebo více ze skupiny fyzikálních jevů zahrnující elastické chování šroubu při namáhání ve smyku, plastické chování šroubu při namáhání ve smyku, elastické chování desky v místě kontaktu s dříkem šroubu (13) a plastické chování desky v místě kontaktu s dříkem šroubu (13).
3. Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce podle kteréhokoliv z předchozích nároků, **vyznačující se tím**, že model pro simulaci axiálního namáhání šroubového spojení obsahuje matematický model jednoho nebo více ze skupiny fyzikálních jevů zahrnující deformační konstantu šroubu, deformační konstantu desky (4) a předpětí šroubového spoje.
4. Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce podle kteréhokoliv z předchozích nároků, **vyznačující se tím**, že zahrnuje model pro simulaci kontaktu mezi deskami (4), který je realizován silovými vazbami.
5. Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce podle kteréhokoliv z předchozích nároků, **vyznačující se tím**, že zahrnuje model pro simulaci kontaktu mezi deskami (4), který je realizován deformačními vazbami.
6. Počítačově realizovaný způsob simulace reálného chování šroubového spojení kovových komponentů stavební konstrukce podle kteréhokoliv z předchozích nároků, **vyznačující se tím**, že pro přenos zatížení ze šroubu na desku (4) se spočítá náhradní spojitě zatížení (6) na ploše hlavy (7) odpovídající velikosti hlavy šroubu nebo podložky šroubu, čímž se získá silová vazba mezi modelem šroubového spojení a uzly sítě spojované desky.

50

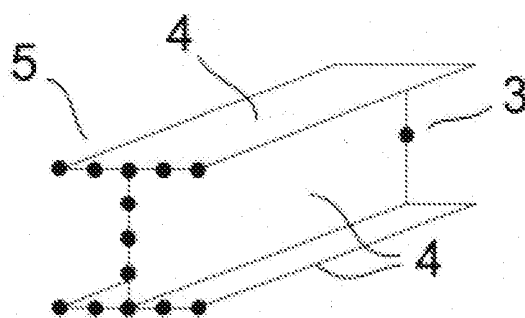
4 výkresy

Seznam vztahových značek:

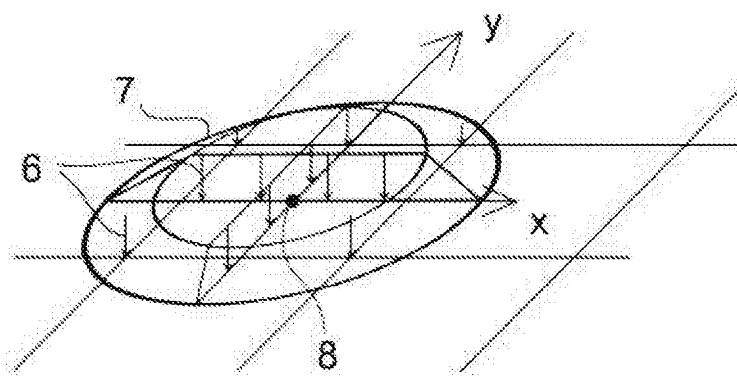
- | | |
|----|---|
| 1 | styčník |
| 2 | prutový prvek |
| 3 | uzel prutového modelu |
| 4 | deska |
| 5 | koncový řez |
| 6 | spojité zatížení |
| 7 | plocha odpovídající velikosti hlavy šroubu nebo podložky šroubu |
| 8 | počátek souřadné soustavy |
| 9 | deformace |
| 10 | síla |
| 11 | šroub |
| 12 | náhradní tlakové těleso |
| 13 | dřík šroubu |
| 14 | posouvající síla |



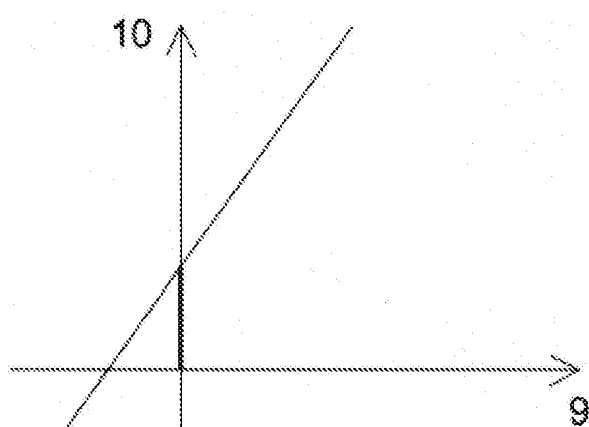
Obr. 1



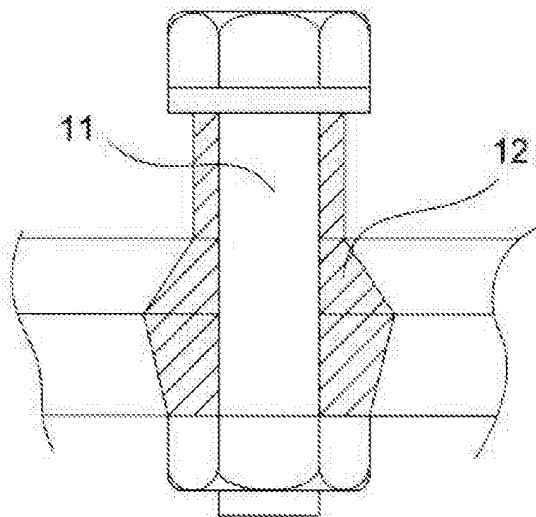
Obr. 2



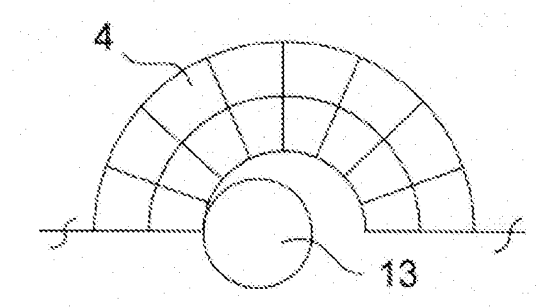
Obr. 3



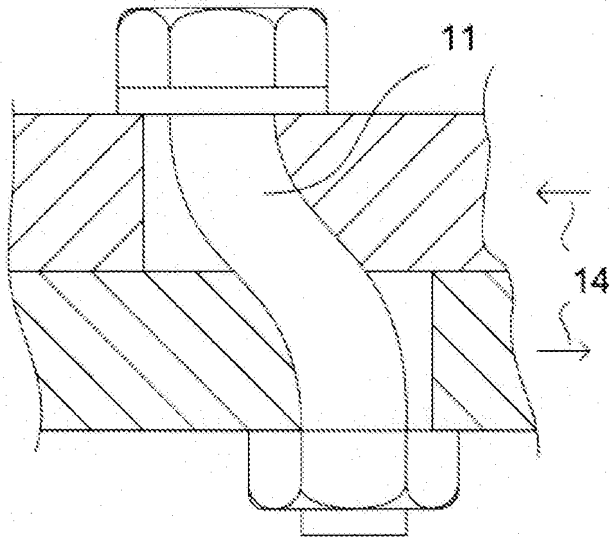
Obr. 4



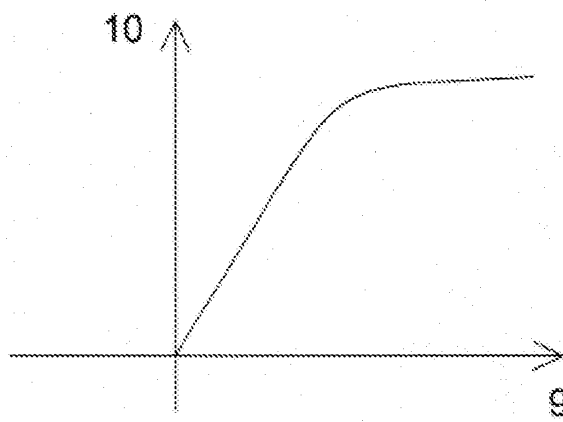
Obr. 5



Obr. 6



Obr. 7



Obr. 8