ZÁKLADY PROJEKTOVANIA KONŠTRUKČNÝCH PRVKOV POMOCOU METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV

Ján Burák, Oskar Ostertag

Elfa
Košice 2010
1. vydanie

ZÁKLADY PROJEKTOVANIA KONŠTRUKČNÝCH PRVKOV POMOCOU METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV

Ján Burák, Oskar Ostertag

Autori: Ing. Ján Burák, PhD., doc. Ing. Oskar Ostertag, PhD.
Recenzenti: prof. Ing. Vladimír Bella, CSc., doc. Ing. Rudolf Zahradníček, CSc.

Publikácia neprešla jazykovou úpravou

Vydavateľstvo Elfa
Košice, 2010
1. vydanie
ISBN 978-80-8086-137-7

www.atriumstudio.sk
architektonické štúdio atrium
architektonické štúdio **atrium**
priestor Vašej **architektúry** / space 4 your **architecture**

UzemnePlany.sk
portál **o budúcnosti**
Generálny partner **Architektonické štúdio Atrium**

Tradix Slovakia spol. s r.o.
www.tradix.sk

OBSAH

PREDSLOV

ÚVOD

Metóda konečných prvkov....8
Aplikácie metódy konečných prvkov....9
Algoritmus navrhovania konštrukčných prvkov pomocou metódy konečných prvkov....10

MKP PREPROCESSING

1. CAD a MKP geometria modelov, typy analýzy MKP....12
1.1. Prispôsobovanie CAD geometrie modelov pre MKP....12
1.1.1. Potlačenie prvkov geometrie....13
1.1.2. Idealizácia geometrie....13
1.1.3. Čistenie geometrie....13
1.2. Typy analýzy MKP....14
1.2.1. Lineárna statická analýza....14
1.2.2. Dynamická analýza....15
1.2.3. Nelineárna statická analýza....15
1.2.3.1. Nelinearity....15
1.2.3.2. Malé a veľké posunutia....16
1.2.4. Únavová analýza....18
1.2.5. Analýza pádu....18
1.2.6. Lineárna stabilitná analýza....18
1.2.7. Frekvenčná analýza....18
1.2.8. Teplotná analýza....18

2. Typy konečných prvkov....19
2.1. Jednorozmerné konečné prvky....20
Delenie jednorozmerných konečných prvkov....21
2.1.1. Prútové jednorozmerné konečné prvky....22
2.1.1.1. Lineárne elastické pružiny ako jednorozmerné konečné prvky....22
Systém konečných prvkov v globálnom súradnom systéme....24
2.1.1.2. Elastické prútové konečné prvky....32
2.1.1.3. Deformačná energia....38
2.1.1.4. Castiglianov prvý teorém....40
2.1.1.5. Minimum potenciálnej energie....44
2.1.2. Prútové konštrukcie, priama tuhostná metóda....47
2.1.2.1. Uzlové rovnice rovnováhy....48
2.1.2.2. Transformácia elementu....52
Smerové kosínusy....54
2.1.2.3. Priame zostavenie globálnej matice tuhosti....55
2.1.2.4. Okrajové podmienky, obmedzujúce sily....58
2.1.2.5. Deformácie a napätia elementu....59
2.1.2.6. Trojrozmerné prútové konštrukcie....73
2.1.2.7. Vybrané jednorozmerné prútové konečné prvky TRUSS....78
2.1.3. Nosníkové jednorozmerné konečné prvky....79
2.1.3.1. Jednoduchá teória nosníkových prvkov....79
2.1.3.2. Nosníkový prvok....82
2.1.3.3. Matica tuhosti nosníkového prvku....86
2.1.3.4. Vektor zaťaženia elementu....89

2.1.3.5. Ekvivalentná práca pre distribuované zaťaženie....94
2.1.3.6. Nosníkový prvok s axiálnym zaťažením....102
2.1.3.7. Všeobecný trojrozmerný nosníkový prvok....108
2.1.3.8. Vybrané jednorozmerné nosníkové konečné prvky BEAM....111

2.2. Dvojrozmerné konečné prvky....114
Delenie dvojrozmerných konečných prvkov....116
2.2.1. Orientácia dvojrozmerných konečných prvkov....118
2.2.1.1. Vybrané dvojrozmerné konečné prvky SHELL....120
2.2.2. Rovinná napätosť....122
2.2.2.1. Formulácia konečných prvkov: trojuholníkový prvok....124
2.2.2.2. Hodnotenie matice tuhosti....127
2.2.2.3. Distribuované zaťaženia a telesová sila....129
2.2.3. Rovinná deformácia....137
2.2.3.1. Formulácia konečných prvkov: obdĺžnikový element....139
2.2.4. Isoparametrická formulácia rovinného quadrilaterálneho elementu....142
2.2.5. Napäťová analýza osovej symetrie....149
2.2.5.1. Formulácia konečných prvkov....152
2.2.5.2. Zaťaženia elementu....154

2.3. Trojrozmerné konečné prvky....157
Delenie trojrozmerných konečných prvkov....157
2.3.1. Priestorová napätosť....159
2.3.1.1. Formulácia konečných prvkov....161
2.3.2. Výpočet deformácie a napätia....163
2.3.2.1. Vybrané trojrozmerné konečné prvky TETRA....166
2.3.3. Krútenie....168
2.3.3.1. Okrajové podmienky....171
2.3.3.2. Krútiaci moment....171
2.3.3.3. Formulácia konečných prvkov....171

Vybrané konečné prvky pre špecifické okrajové podmienky....175
Ukážky rôznych typov konečných prvkov....176

3. Metóda váhových rezíduí....185
3.1. Galerkinova váhová funkcia....186
3.2. Galerkinova metóda konečných prvkov....195
3.2.1. Formulácia elementov....197
3.3. Aplikácia Galerkinovej metódy do konštrukčných prvkov....204
3.3.1. Prútový prvok....204
3.3.2. Nosníkový prvok....205

4. Interpolačné funkcie pre všeobecnú formuláciu prvkov....208
4.1. Požiadavky kompatibility a kompletnosti....208
4.1.1. Kompatibilita....208
4.1.2. Kompletnosť....209
4.2. Polynomické formy: Jednorozmerné konečné prvky....210
4.2.1. Jednorozmerné konečné prvky vyššej úrovne....218
4.3. Polynomické formy: Geometrická izotropia....222
4.4. Trojuholníkové konečné prvky....224
4.4.1. Plošné súradnice....227
4.4.2. Šesť nódový trojuholníkový konečný prvok....229
4.4.3. Integrácia v plošných súradniciach....230
4.5. Obdĺžnikové konečné prvky....231

4.6. Trojrozmerné konečné prvky....236
4.6.1. Štvornódový štvorstenný konečný prvok....236
4.6.2. Osem nódový tehlový element....238
4.7. Isoparametrická formulácia....240
4.8. Osovo symetrické elementy....246
4.9. Numerická integrácia, Gaussova kvadratúra....250

Ukážky rôznych typov interpolačných funkcií....258

5. Okrajové podmienky, materiálové vlastnosti, sieť konečných prvkov....261
5.1. Okrajové podmienky....261
5.1.1. Geometrické okrajové podmienky....261
5.1.1.1. Stupne voľnosti....263
5.1.2. Silové okrajové podmienky....264
5.1.2.1. Zaťažovacie stavy....265
5.1.2.2. Imperfekcie konštrukčných prvkov....266
5.2. Spojenia a kontakty....268
5.2.1. Spojenia....268
5.2.2. Kontakty....269
5.2.2.1. Globálny kontakt....269
5.2.2.2. Kontakt komponentov....270
5.2.2.3. Lokálny kontakt....270
5.2.2.4. Kontakt nód – nód....272
5.2.2.5. Kontakt nód – plocha....272
5.2.2.6. Kontakt plocha – plocha....272
5.3. Materiálové vlastnosti....273
5.3.1. Poissonova konštanta....273
5.3.2. Youngov modul pružnosti....274
5.3.3. Materiálové modely....275
5.4. Diskretizácia resp. sieť konečných prvkov....277
5.4.1. Typ konečných prvkov....278
5.4.2. Veľkosť konečných prvkov, počet konečných prvkov....278
5.4.3. Vzhľadový pomer konečných prvkov....279
5.4.4. Kontrola Jakobiánom....281
5.4.5. Lokálne zhustenie siete....281
5.4.6. Automatické prechody....283
5.4.7. Automatické opakovanie....283
5.4.8. Tolerancia....284
5.4.9. Kompatibilná a nekompatibilná sieť....284
5.4.10. Voľné a usporiadané automatické sieťovanie....286
5.4.11. Úprava siete....287
5.4.12. Sieťovanie tenkého telesa pomocou 3 – D konečných prvkov....288
5.4.13. Etapy sieťovania....288
5.4.14. Diagnostika poruchy siete....288

MKP PROCESSING

6. Typy riešičov, metódy a parametre výpočtu....290
6.1. Typy riešičov....290
6.2. Metódy výpočtu....290
6.3. Parametre výpočtu....291
6.3.1. Tlmiace pružiny....291
6.3.2. Vplyv zotrvačnosti....291
6.3.3. Efekty tuhosti....291

MKP POSTPROCESSING

7. Dimenzovanie konštrukčných prvkov a výsledky simulácií MKP.....293
7.1. Dimenzovanie konštrukčných prvkov.....293
7.1.1. Medzné stavy únosnosti a použiteľnosti.....293
7.1.2. Módy poškodenia.....293
7.1.3. Teórie pevnosti.....295
7.1.3.1. Haighov priestor.....296
7.1.4. Parciálne faktory spoľahlivosti a koeficienty bezpečnosti.....297
7.2. Výsledky simulácií MKP.....299
7.2.1. Spôsoby zobrazenia výsledkov MKP.....300
7.2.1.1. Tenzorové zobrazenie výsledkov.....300
7.2.1.2. Animácia.....300
7.2.1.3. Rezy.....300
7.2.1.4. ISO zobrazenie.....300
7.2.1.5. Sonda.....301
7.2.1.6. Parametre zobrazenia výsledkov.....301
7.2.2. Hodnoty výsledkov v elementoch a nódoch.....301
7.2.3. Napäťové singularity.....302
7.2.4. Zmena súradného systému.....304
7.2.5. Nastavenie jednotiek.....304
7.2.6. Verifikácia riešenia úlohy.....305
7.2.6.1. Alternatívy riešenia úlohy.....305
7.2.6.2. Nezávislosť riešenia úlohy.....305
7.2.7. Export výsledkov.....305
7.3. Spracovanie výsledkov MKP v programe Matlab.....306
7.3.1. Programovací jazyk Matlab.....306
7.3.2. Knižnice Matlabu.....306
7.3.3. Import a export dát.....306
7.3.4. Vektory, matice a príkazy v matlabe.....307
7.3.4.1. Elementárne matice.....307
7.3.4.2. Zápis a operácie s vektormi a maticami.....307
7.3.4.3. Fourierova transformácia.....308
7.3.4.4. Jazykové štruktúry.....308
7.3.4.5. Správa pracovného priestoru a príkazového okna.....308
7.3.4.6. Elementárne funkcie.....308
7.3.4.7. Matematické operátory a špeciálne znaky.....309
7.3.4.8. Štatistické testy hypotéz.....309
7.3.5. Práca s grafikou.....310
7.3.5.1. Typy grafov.....310
7.3.5.2. Popis grafov.....310
7.3.5.3. Symboly pre rôzne typy čiar.....310
7.3.5.4. Symboly pre rôzne typy zobrazenia bodov.....310
7.3.5.5. Základné farby.....310

Príklad pre postprocessing dát MKP – indikátor biaxiality, faktor bezpečnosti a S-N krivky pre predikciu životnosti.....313

VŠEOBECNÉ ODPORÚČANIA.....319

LITERATÚRA.....320

PREDSLOV

Predkladaná publikácia je prvým vydaním teoreticko – praktickej príručky pre užívateľov softvérov pre konštrukčnú aplikáciu metódy konečných prvkov. Táto teoreticko – praktická príručka je doplnená vybranými časťami teórie potrebnej pre vysvetlenie a pochopenie niektorých častí rozsiahlej problematiky navrhovania konštrukčných prvkov, navrhovania častí rôznych zariadení, častí prístrojov a pod. pomocou metódy konečných prvkov. Táto publikácia sa tiež venuje základom matematického pozadia metódy konečných prvkov aj s využitím riešených analytických príkladov. Je pochopiteľné, že porozumením pozadia metódy konečných prvkov je pravdepodobnosť jej správneho využitia vyššia. Pre kompletné porozumenie matematického pozadia metódy konečných prvkov by samozrejme bolo potrebné rozumieť celému matematickému aparátu, čo ale nie je obsahom ani cieľom tejto publikácie.

Predkladaná publikácia sa vo väčšej miere venuje lineárnej statickej analýze s využitím metódy konečných prvkov a všeobecnými princípmi a parametrami metódy konečných prvkov využiteľnými v štandardných softvéroch aj pre iné analýzy metódy konečných prvkov.

Je kompiláciou uvedenej použitej literatúry, do ktorej patria rôzne odborné publikácie (knihy, články, manuály, helpy, normy), a je doplnená o vlastné skúsenosti a vedomosti autora s úsilím zostaviť zrozumiteľnú teoreticko – praktickú príručku so základnými informáciami pre navrhovanie konštrukčných prvkov pomocou metódy konečných prvkov.

Táto publikácia je prioritne určená pre študentov technických vysokých škôl. Je doplnená množstvom obrázkov pre grafickú interpretáciu a vysvetlenie mnohých niekedy komplikovane popisovaných faktov („je lepšie raz vidieť ako dva krát počuť“). Je tiež doplnená anglickými názvami v súvislosti s jazykovou vybavenosťou softvérov a pre kompatibilitu s rozsiahlou zahraničnou literatúrou (kľúčové slová pre vyhľadávanie) a pod. Je tu tiež snaha, aj v súvislosti s prehľadnosťou, vytvoriť priestor, samozrejme v obmedzenom rozsahu, pre poznámky čitateľa.

Navrhovanie konštrukčných prvkov pomocou metódy konečných prvkov vyžaduje vysokú úroveň vedomostí a skúseností z oblasti matematiky, mechaniky, náuky o materiáloch, navrhovania oceľových konštrukcií pomocou noriem, z oblasti samotnej metódy konečných prvkov a pod.

Pre mojich študentov

Poďakovanie

Na tomto mieste sa chcem úprimne poďakovať pánovi doc. Ing. Karolovi Kubínovi, CSc. za jeho ochotu pri mojom štúdiu, tiež sa chcem poďakovať spoluautorovi doc. Ing. Oskarovi Ostertagovi, PhD. za spoluprácu pri tvorbe publikácie.

Samozrejme ďakujem svojej manželke Katke a dcérke Esterke za ich nekonečnú trpezlivosť a tolerantnosť pre moje dlhé hodiny venované štúdiu.

Rovnako sa chcem poďakovať sponzorom, architektonickému štúdiu Atrium s.r.o., portálu www.UzemnePlany.sk a firme Tradix Slovakia s.r.o., ktorí ma materiálne podporili pri tvorbe tejto publikácie.

V nie poslednom rade ďakujem recenzentom tejto publikácie prof. Ing. Vladimírovi Bellovi, CSc. a doc. Ing. Rudolfovi Zahradníčkovi, CSc. za ich ochotu a cenné rady.

Ján Burák

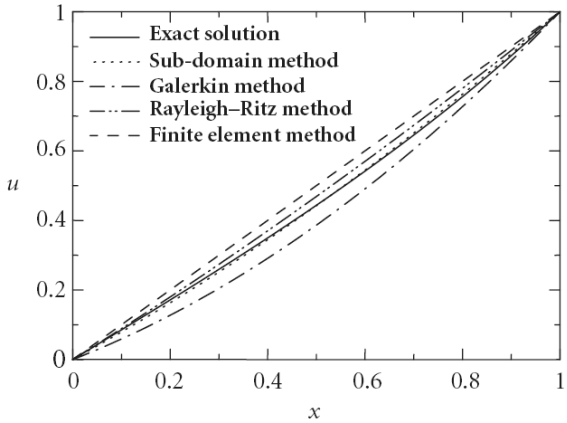
ÚVOD

Metóda konečných prvkov

Popis rôznych fyzikálnych problémov obyčajne vedie k parciálnym diferenciálnym rovniciam. Exaktné riešenie týchto rovníc analytickým spôsobom v mnohých prípadoch nepoznáme. Preto začali vznikať metódy, ktoré prevádzajú úlohu exaktnej integrácie parciálnych diferenciálnych rovníc na rovnocennú variačnú úlohu. Tieto metódy sa nazývajú variačné metódy. Podstata riešenia diferenciálnych rovníc variačnými metódami je, že hľadané funkcie, ktoré majú vyhovovať diferenciálnym rovniciam a daným okrajovým podmienkam nahradíme výrazmi, ktoré budú čo najlepšie aproximovať hľadané funkcie. Existuje viacero variačných metód ku ktorým patrí napr. Ritzova metóda, Galerkinova metóda, Timošenkova metóda, Trefftzova metóda, Bubnovova metóda, metóda konečných prvkov a iné. Jednotlivé variačné metódy sa od seba líšia voľbou základnej (aproximačnej) funkcie a spôsobom výpočtu neznámych koeficientov. Napríklad Ritzova metóda počíta neznáme koeficienty z minima potenciálnej energie a Galerkinova metóda z ortogonality základných funkcií.

Metóda konečných prvkov (MKP) (Finite Element Method – FEM, Finite Element Analysis – FEA) patrí medzi najpoužívanejšie variačné numerické metódy v technickej praxi ku ktorým tiež patria metóda konečných diferencií (finite difference method) a metóda okrajových prvkov (boundary element method). Na metódu konečných prvkov sa môžeme pozerať ako na počítačovo orientovanú matematickú techniku, pomocou ktorej môžeme získať aproximačné numerické riešenie rovníc s vysokým počtom neznámych, ktoré opisujú správanie sa skúmaného systému. Metóda konečných prvkov tvorí silný univerzálny nástroj spájajúci niekoľko matematicko – fyzikálnych princípov.

Princíp metódy konečných prvkov je v rozdelení (diskretizácii) skúmanej oblasti a skúmanej hľadanej funkcie na konečný počet prvkov, tzv. sieť, pomocou ktorých aproximujeme skúmanú oblasť a hľadanú funkciu. Simulácie pomocou metódy konečných prvkov sú zostavené zo všeobecne platného algoritmu a nachádzajú sa prakticky vo všetkých odvetviach technickej praxe.



Obr.MKP Všeobecné porovnanie výsledkov rôznych druhov variačných metód a exaktného riešenia [31]

Literatúra

V tejto časti je uvedená použitá a odporúčaná literatúra pre prehĺbenie vedomostí z uvedenej problematiky.

Metóda konečných prvkov

[1] Hutton, V., D.: Fundamentals of finite element analysis, McGraw – Hill Companies, Inc., New York, 2004,
[2] Ivančo, V., Kubín, K., Kostolný, K.: Program Cosmos/M, Košice, 2000,
[3] Ivančo, V., Kubín, K., Kostolný, K.: Metóda konečných prvkov, Košice, 1994,
[4] Kutiš, V.: Základy modelovania a simulácii, Bratislava, 2006,
[5] Liu, G., R., Quek, S., S.: The finite element method: a practical course, Elsevier Science Ltd., 2003,
[6] Kwon, Y., W., Bang, H.: The finite element method using matlab, CRC Press LLC, 1997,
[7] Cook, R., D.: Finite element modeling for stress analysis, JohnWiley & Sons, Inc., 1995,
[8] Fish, J., Belytschko, T.: A First Course in Finite Elements, JohnWiley & Sons, Ltd., 2007,
[9] Segerling, L., J.: Applied Finite Element Analysis, JohnWiley & Sons, Inc., 1984,
[10] Soheil Mohammadi: Extended Finite Element Method, Blackwell Publishing Ltd., 2008,
[11] Saeed Moaveni: Finite element analysis – theory and application with ANSYS, Prentice – Hall, 1999,
[12] Akin, J., E.: Finite element analysis with error estimators, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005,
[13] Zienkiewicz, O., C., Taylor, R., L.: The finite element method, volume 1: The basis, Butterworth-Heinemann, 2000,
[14] Zienkiewicz, O., C., Taylor, R., L.: The finite element method, volume 2: Solid mechanics, Butterworth-Heinemann, 2000,
[15] Zienkiewicz, O., C., Taylor, R., L.: The finite element method, volume 3: Fluid dynamics, Butterworth-Heinemann, 2000,
[16] Becker, E., B., Carey, G., F., Oden, J., T.: Finite elements – an introduction, volume 1, Prentice – Hall 1981,
[17] Macneal, R., H.: Finite elements: their design and performance, Marcel Dekker, Inc., 1994,
[18] Buchanan, G., R.: Finite element analysis, McGraw – Hill Companies, Inc., 1995,
[19] Zimmerman, W., B., J.: Process modeling and simulation with finite element method, World Scientific Publishing Co. Re. Ltd., 2004,
[20] Reddy, J., N.: Solution manual for an introduction to the finite element method, McGraw – Hill Companies, Inc., 2005,
[21] Hartmann, F., Katz, C.: Structural analysis with finite elements, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007,
[22] Kochaník, J., Vojtko, I.: Metóda konečných prvkov v teórii a príkladoch, Prešov, 2007,
[23] Hunter, P.: Finite element method/boundary element method, New Zealand, 2001,
[24] Singiresu, S., Rao: The finite element method in engineering, Elsevier Science & Technology Books, 2004,
[25] Saouma, V., E.: Matrix structural analysis with an introduction to finite elements, 1999,
[26] Šolín, P., Segeth, K., Doležel, I.: Higher – order finite element methods, Chapman & Hall/CRC, 2004,
[27] Liu, G., R.: Mesh free methods: moving beyond the finite element method, CRC Press LLC, 2003,
[28] Jianping Geng, Weiqi Yan, Wei Xu: Application of the finite element method in implant dentistry, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springsr – Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2008,
[29] Bishop, N., W., M., Sherratt, F.: Finite element based fatigue calculations, 2000,
[30] Ben, Q., Li,: Discontinuous finite elements in fluid dynamics and heat transfer, Springer-

Verlag London Limited, 2006,
[31] Stolarski, T., Nakasone, Y., Yoshimoto, S.: Engineering analysis with ansys software, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006,
[32] Nicholson, D., W.: Finite element analysis, thermomechanics of solids, CRC Press LLC, 2003,
[33] Flaherty, J., E.: Finite element analysis, lecture notes, 2000,
[34] Zhangxin, Chen: Finite element methods and their applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005,
[35] Bathe, K., J.: Finite element procedures, Prentice – Hall 1996,
[36] Connor, J.,J., Brebbia, C.,A.: Finite element techniques for fluid flow, Butterworth&Co, 1976
[37] Dhondt, G.: The finite element method for three dimensional thermomechanical applications, John Willey & Sons, 2004,

Navrhovanie konštrukčných prvkov

[38] Draper J.: Modern metal fatigue analysis, EMAS Publishing, ISBN 0947817794, 2008,
[39] Li, J., Jin, Li, Guo, Q.: Advanced analysis and design of steel frames, John Wiley & Sons, Ltd., 2007,
[40] Yung-Li Lee, Jwo Pan, Hathaway R., Barkey M.: Fatigue testing and analysis, theory and practice, Elsevier, ISBN 0-7506-7719-8, 2005,
[41] Theodore Nicholas: High Cycle Fatigue A Mechanics of Materials Perspective, Elsevier, ISBN 0-08-044691-4, 2006,
[42] Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs: Metal fatigue in engineering, Wiley Interscience, ISBN 0-471-51059-9, 2001,
[43] Jaap Schijve: Fatigue of structures and materials, Kluwer Academic Publisher, ISBN 0-7923-7013-9, 2004,
[44] Trebuňa, F., Buršák, M.: Medzné stavy – lomy, Grafotlač, Prešov, 2002,
[45] Trebuňa, F., Šimčák, F., Jurica, V.: Pružnosť a pevnosť 1, Košice, 2005,
[46] Trebuňa, F., Jurica, V., Šimčák, F.: Pružnosť a pevnosť 2, Košice, 2000,
[47] Hearn, E. J.: Mechanics of materials 1, Butterworth Heinemann, ISBN 0 7506 3265 8, third edition, 1997,
[48] Hearn, E. J.: Mechanics of materials 2, Butterworth Heinemann, ISBN 0 7506 3266 6, third edition, 1997,
[49] Studnička, J.: Ocelové konstrukce 10, ČVUT, 2000,
[50] Manual for the design of steelwork building structures to EC3, The Institution of Structural Engineers, 2000,
[51] Megson, T., H., G.: Structural and stress analysis, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005,
[52] Pilkey, W., D.: Formulas for stress, strain, and structural matrices, John Willey & Sons, Inc., 2005,
[53] Budynas, R., G., Nisbett, J., K.: Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw – Hill Companies, Inc., 2006,
[54] Salmon, Ch., G., Johnson, J., E., Malhas, F., A.: Steel structures: design and behavior, Pearson education, Inc., 2009,
[55] Chanakya, Arya: Design of structural elements: concrete, steelwork, masonry and timber design to British Standards and Eurocodes, Taylor & Francis, 2009,
[56] Chen, W., F., Lui, Eric, M.: Principles of structural design, Taylor & Francis, 2006,
[57] Chen, W., F.: Structural Engineering Handbook, CRC Press LLC, 1999,
[58] Norton, R., L.: Machine design, an integrated approach, Pearson education, Inc., 2006,

Odborné články

[59] D. Alfred Hancq, Ansys Inc. – Fatigue analysis using ANSYS,
[60] CosmosWorks, White paper, Design to Prevent Fatigue, 2005,
[61] Gaier, C., Dannbauer, H.: Fatigue Analysis of Multiaxially Loaded Components with the FE-Postprocessor FEMFAT-MAX, Engineering Center Steyr, Austria,
[62] Akin, J., E.: Concepts of buckling, 2006,
[63] Osman Kopmaz, Ömer Gündogdu: On the curvature of an Euler–Bernoulli beam, International Journal of Mechanical Engineering Education 31/2,

Manuály

[64] Solid Works Simulation 2009 training manual,
[65] Solid Works Simulation Professional 2009 training manual,

Helpy

[66] Matlab R2008a,
[67] SolidWorks 2009 (2008),
[68] CosmosGeostar 2009,

Normy

[69] Eurokód 3 – 1 – 1: 2001, Design of steel structures – general structural rules,
[70] Eurokód 3 – 1 – 2: 2002, Design of steel structures – general rules – structural fire design,
[71] Eurokód 3 – 1 – 3: 2001, Design of steel structures – supplementary rules for cold formed thin gauge memebers and sheeting,
[72] Eurokód 3 – 1 – 5: 2004, Design of steel structures – plated structural elements,
[73] Eurokód 3 – 1 – 6: 2004, Design of steel structures – strength and stability of shell structures,
[74] Eurokód 3 – 1 – 8: 2004, Design of steel structures – design of joints,
[75] Eurokód 3 – 1 – 5: 2002, Design of steel structures – plated structural elements,
[76] Eurokód 3 – 1 – 5: 2003, Design of steel structures – fatigue,
[77] STN 73 1401: 1998 – Navrhovanie oceľových konštrukcií,
[78] Juhás, P., a kol.: Navrhovanie oceľových konštrukci, Komentár k STN 73 1401:1998, SÚTN, Bratislava, 2001,
[79] STN 73 0035: 1986 – Zatížení stavebních konstrukcí,
[80] STN 27 0103: 1989 – Navrhovanie oceľových konštrukcií žeriavov,
[81] BS 5950-1:2000: Structural use of steelwork in building, Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections,
[82] BS 5950-2:2001: Structural use of steelwork in building, Part 2: Specification for materials, fabrication and erection – rolled and welded sections,
[83] BS 5950-3:1990: Structural use of steelwork in building, Part 3: Design of composite construction,
[84] BS 5950-4:1994: Structural use of steelwork in building, Part 4: Code of practice for design of composite slabs with profiled steel sheeting,
[85] BS 5950-5:1998: Structural use of steelwork in building, Part 5: Code of practice for design of cold formed thin gauge sections,
[86] BS 5950-6:1995: Structural use of steelwork in building, Part 6: Code of practice for design of Light gauge profiled steel sheeting,
[87] BS 5950-7:1992: Structural use of steelwork in building, Part 7: Specification for materials and workmanship: cold formed sections,
[88] BS 5950-8:1990: Structural use of steelwork in building, Part 8: Code of practice for fire resistant design,
[89] BS 5950-9:1994: Structural use of steelwork in building, Part 9: Code of practice for stressed

skin design,
[90] DIN 18800 – Part1 – Structural steelwork, design and construction, 1990,
[91] DIN 18800 – Part2 – Structural steelwork, analysis of safety against buckling of linear members and frames, 1990,
[92] DIN 18800 – Part3 – Structural steelwork, analysis of safety against buckling of plates, 1990,
[93] DIN 18800 – Part4 – Structural steelwork, analysis of safety against buckling of shells, 1990,
[94] DIN 15018 – Part1 – Cranes steel structures, verification and analyses, 1984,
[95] DIN 15018 – Part2 – Cranes steel structures, principles of design and construction, 1984,
[96] DIN 15018 – Part3 – Cranes, principles relating to steel structures, design of cranes on vehicles, 1984,
[97] NASA-STD-5001: Structural design and test factors of safety for spaceflight hardware, 1996,

Softvér
[98] Matlab R2008a,
[99] SolidWorks 2009,
[100] CosmosGeostar 2009,

Webovské stránky
[101] www.solidworks.com,
[102] www.mathworks.com,
[103] www.wikipedia.org.

Autori: Ing. Ján Burák, PhD.,
doc. Ing. Oskar Ostertag, PhD.

Recenzenti: prof. Ing. Vladimír Bella, CSc.
doc. Ing. Rudolf Zahradníček, CSc.

Názov: Základy projektovania konštrukčných prvkov pomocou metódy konečných prvkov

Vydanie: 1. Vydanie, 2010

Rozsah: 324 strán

Náklad: 50ks

Vydal: elfa, s.r.o., Košice, 595. publikácia

Tlač: elfa, s.r.o., Košice

ISBN 978-80-8086-137-7

Tradix Slovakia spol. s r.o., Váš spoľahlivý partner.

PEGARUST

PRUŽNÝ ANTIKORÓZNY NÁTER

Profesionálne riešenie v boji proti korózii.

PEGARUST je jednozložkový rozpúšťadlový antikorózny náter na báze vysokomolekulárnych alkydových polymérov. Primárne je určený ako dlhodobá ochrana oceľových, pozinkovaných a hliníkových povrchov. Náter má excelentné adhézne vlastnosti na väčšinu vyskytujúcich sa povrchov, má zvýšenú pružnosť a odolnosť voči poveternostným vplyvom. Je určený ako dlhodobá antikorózna ochrana pre hobby aj profi použitie. Aplikácia je možná aj vo vlhkom prostredí pri teplotách až do -5°C. Možnosť nanášania štetcom, valcom, vzduchovým aj bezvzduchovým striekaním. PEGARUST má vysokú kryciu schopnosť už v jednej vrstve bez použitia základového náteru a taktiež na dobre súdržné staré nátery.

Vzhľad:	saténový lesk 70 %
Výdatnosť:	4m²/l > 100 µm suchý a 285 µm mokrý film
Suchý na prach:	po 1,5 hod.
Pretierateľný:	po 24 hod.
Odolný voči dažďu:	po 2 hod.
Riedenie:	nie je potrebné
Odolný voči manipulácii:	po 3 - 4 hod.
Obsah VOC:	550 g/liter

Prečo PEGARUST?

- Jednoduchá aplikácia už v 1 vrstve.
- Priamo na oceľ, pozink, hliník.
- Aplikácia aj v chladnom a vlhkom počasí.
- Pružnosť, farebná stálosť a odolnosť voči atmosterickým vplyvom.

PEGARUST je k dispozícii v 4 základných odtieňoch v 5 l a 20 l baleniach, ostatné podľa požiadavky.

www.tradix.sk

Kontakt: Kovaľská 1A, 040 15 Košice, tel.: 055/ 72 88 551-3, 0903626900, tradix@tradix.sk.

Tradix Slovakia spol. s r.o., Váš spoľahlivý partner.

Alkyton je samozákladový, jednozložkový, alkyd-uretánový email. Vykazuje excelentnú pružnosť, UV stabilitu a dlhodobé antikorózne vlastnosti. Dodáva sa v 0,25l, 0,75l a 5l baleni. K dispozícii je široká škála odtieňov v lesklých, saténových/polomatných, matných a kladivkových prevedeniach. Výdatnosť: do 10,5 m^2/l. Svojou kvalitou a univerzálnosťou použitia ponúka Alkyton jednu z najvýhodnejších alternatív antikoróznych náterov na slovenskom trhu. Alkyton môže byť aplikovaný priamo na podklad, alebo v kombinácii so špecializovanými základovými nátermi.

Novinkou na trhu je **Alkyton** v kováčskom prevedení, ktorý je svojím špeciálnym grafitovým vzhľadom predurčený ako antikorózna ochrana kováčskych výrobkov, ako sú kované brány a ploty, ako aj rôzne produkty umeleckého kováčstva.
Dodáva sa v 0,25l, 0,75l a 2,5l balení a v zelenom a čiernom odtieni.

Primer + je antikorózny, rýchloschnúci, alkydový základ, ktorý sa používa ako príprava nového, resp. mierne skorodovaného povrchu pred aplikáciou vrchného emailu **Alkyton**. Aplikáciou základného náteru **Primer +** podstatne predĺžite životnosť a antikorózne vlastnosti náterového systému. Dodáva sa v 0,25l, 0,75l a 5l balení, v červenohnedom a svetlo sivom odtieni.

Penetrátor korózie slúži ako hĺbkový penetračný základ a je unikátnym riešením antikoróznej ochrany kovov. Prostredníctvom rybích olejov, ktoré sú obsiahnuté v syntetických živiciach, plne vytesní a zbaví vlhkosti aj silne skorodovaný povrch. Svojimi silnými antikoróznymi vlastnosťami, spolu s vysokou výdatnosťou až 14,5m^2/l, patrí medzi najvýhodnejšie antikorózne základy trhu. Dodáva sa v 0,25l, 0,75l a 5l balení, v červenohnedom a svetlo sivom odtieni.

Galvinol slúži ako adhézny / lepivý základ na galvanicky upravené povrchy, hliník, zinok, meď, chróm, nerez, sklo, keramiku a niektoré plasty. Nejedná sa o reaktívny základ, ale pomocou špeciálnych pojív zabezpečuje priľnutie na veľmi hladkých povrchoch. Vzhľadom na univerzálne vlastnosti, širokú škálu použitia a extrémne vysokú výdatnosť, až 35m^2/l, patrí Galvinol medzi najobľúbenejšie základové materiály na ľahké kovy a pozinkovaný plech.
Dodáva sa v 0,25l, 0,75l a 5l balení, v svetlo modrom odtieni.

Kontakt: Kovaľská 1A, 040 15 Košice, tel.: 055/ 72 88 551-3, 0903626900, tradix@tradix.sk, www.tradix.sk