

REZUMATUL *tezei de doctorat*

**„ENGINEERING CRITICAL ASSESSMENT OF THE CYLINDRICAL SHELL
STEEL STRUCTURES”**

**„EVALUAREA CRITICĂ A STRUCTURILOR METALICE CILINDRICE TIP
CURBE SUBȚIRI (SHELL)”**

În domeniul de studii universitare de doctorat: INGINERIE CIVILĂ

Autor: Ing. Dorin RADU

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. Radu BĂNCILĂ și Prof. dr. ing. Aleksandar SEDMAK

Data: Februarie 2017

Siguranța în exploatare a construcțiilor, fapt ce include multe aspecte legate de vulnerabilitatea structurilor, prezintă o importanță majoră într-o societate.

În cazul structurilor metalice, existența defectelor în zone critice ale elementelor structurale poate duce la cedări, iar în cazul lipsei de redundanță structurală chiar la cedarea (colaps) întregii structuri.

Cercetarea din prezenta teză este axată pe evaluarea defectelor decelate în structurile metalice în formă de cilindru de tip curbe subțiri (shell) cu ajutorul mecanicii ruperii. Astfel se prezintă algoritmi și proceduri de calcul pentru a considera în proiectarea structurilor eventualul impact al unor potențiale defecte viitor decelate.

Evaluarea structurilor metalice, aplicând principiile mecanicii ruperii, este o abordare de expertiză și calcul pentru structuri existente ale elementelor platformelor marine și a conductelor de tip magistrală. Pentru a studia condițiile de exploatare a structurilor existente și condițiile de proiectare, se impune o abordare similară și la evaluarea și calculul structurilor metalice ale construcțiilor de tip poduri metalice și construcțiilor civile. Prevederile Eurocode precum și a altor normative de proiectare, prezintă doar abordări de tip conservativ cu două implicații: la nivel de analiză cu cerințe în calculul elementelor și al îmbinărilor (de exemplu îmbinări sudate) și la manufacturarea elementelor structurii prin considerarea calității structurii metalice și a îmbinărilor acesteia.

Teza prezintă în mod detaliat o metodologie de evaluare și determinare a acceptabilității defectelor decelate în structurile metalice de tip shell. Pe baza principiilor mecanicii ruperii, sunt prezentate proceduri și reguli necesare în întreținerea, expertizarea și verificarea acestor tipuri de structuri. Această metoda de evaluare a defectelor/fisurilor reprezintă primul pas într-o metodologie complexă bazată pe principiile mecanicii ruperii și urmată apoi de o analiză la oboseală a elementelor evaluate, analiză prin care se determină durata în exploatare până la cedare pentru structura/elementele structurii

În cele ce urmează este prezentat, în mod succinct, conținutul tezei pe capitole.

Capitolul 1

În capitolul 1 – Introducere este prezentată importanța subiectului tezei. Sunt detaliate mai multe tipuri de defecte posibil decelate în structuri metalice de tip shell, factori pentru rupere fragilă și cauze pentru diferite tipuri de defecte.

De asemenea este prezentat un studiu de caz – răsturnarea platformei marine Aleksander Kielland, cu prezentarea cauzei directe – cedarea unei diagonale cauzate de oboseală. Abordarea cazului este făcută conformă principiilor mecanicii ruperii.

Capitolul 2

În capitolul 2 este prezentată o sinteză a informațiilor cu privire la mecanica ruperii și aplicarea acesteia la structurile metalice de tip shell. Mecanica ruperii în domeniu liniar elastic, în domeniul elastic-plastic și calculul la oboseala sunt prezentate ca premise pentru capitolele ulterioare ale cercetării. De asemenea sunt prezentate metode standard de determinare experimentală a parametrilor mecanicii ruperii.

Pot fi făcute evaluări pentru siguranța în exploatare a structurilor conform abordării mecanicii ruperii, pe baza principiului de cumulare a vătamarilor. Este prezentată în mod detaliat procedura acestui proces de evaluare.

Capitolul 3

În acest capitol se prezintă abordarea Eurocode (EN1993-1-6) pentru analiza și calculul de verificare al elementelor metalice cilindrice de tip shell – rezistența și stabilitatea plăcilor curbe subțiri. Rezistența la pierderea stabilității este cel mai important aspect în calculul acestor tipuri de structuri. Pierderea stabilității generală poate fi definită ca o cedare bruscă, sau instabilitate, pentru un element sollicitat la eforturi de compresiune. Instabilitatea se produce la un punct de maxim al curbei încărcare - deformare, punct la care instabilitatea se poate încadra în două categorii: bifurcarea de echilibru sau forța limită de pierdere a stabilității. Este subliniată importanța imperfecțiunilor elementelor de tip shell și sunt relevate principiile de proiectare cu aplicații directe în analiza acestor tipuri de structuri. Astfel se prezintă un studiu de caz – o structură metalică de tip reclamă cu înălțimea de treizeci de metri realizată dintr-un stâlp cu secțiune cilindrică (element de tip shell) și o parte superioară ce prezintă o structură spațială cu zabrele în formă plană triunghi cu latura de 21m. Este detaliată procedura de evaluare de încărcări conform normativului Eurocode. Pentru a furniza informațiile necesare pentru calculul prezentat la capitolul 6 – calculul la oboseală al structurii, se evaluează detaliat încărcarea din vânt (calculul este prezentat în anexa 1).

Capitolul 4

Pentru analiza structurii de tip shell – structura prezentată în capitolul 3, se utilizează o analiză pe baza de elemente finite. Turnul prezintă o secțiune circulară cu un diametru de 1.680mm realizat din patru tronsoane – de la bază spre vârf: cilindru 1680 x 20 mm – 7 m, cilindru 1680 x 16 mm – 8 m, cilindru 1680 x 12 – 7 m și cilindru 1680 x 10 – 8 m. Într-un prim pas, întreaga structură este considerată în analiză – se realizează o analiză de tip LA (analiză liniară), pentru a determina tensiunile în secțiunile critice ale structurii. În urma rezultatelor, sunt prezentate forțele interne de dimensionare pentru fiecare tronson în parte.

După calculul liniar (LA), sunt calculate în mod analitic forțele aplicate pe structură la pierderea stabilității. Astfel sunt determinate tensiuni critice de tip meridian și circumferențial. Calculul tensiunilor ce apar în pereții elementului cilindric este realizat pe baza principiilor teoriei plăcilor curbe – anexa A2 din EN1991-1-6. În anexa 2 la prezenta teză este prezentat în mod detaliat calculul pentru fiecare tronson al stâlpului de secțiune cilindrică.

Un al doilea pas în calculul structurii este utilizarea analizei cu elemente finite pentru calculul îmbinării tronsoanelor. Aceasta reprezintă un calcul mai detaliat. Astfel este considerată îmbinarea cu tensiunile cele mai mari – tronson $t=16$ cu tronson $t=20$ mm. Au fost realizate comparații între rezultatele analizelor FEM (structura/element); rezultatele sunt similare cu mici diferențe.

Pentru modelul cu îmbinarea tronsoanelor a fost realizată și o analiză de tip LBA – analiză de bifurcare liniar elastică. Rezistența elastică critică la pierderea stabilității este determinată pe baza unei analize de valori proprii aplicată stării de tensiune calculată liniar elastic pe o placă cu o geometrie perfectă (LA) sub acțiunea valorilor de calcul a combinațiilor de încărcări. Au fost calculate primele zece valori proprii de pierdere a stabilității, rezultând astfel rezistența elastică critică la pierderea stabilității ca factor de multiplicare al sarcinilor elastice.

În urma rezultatelor analizei de valori proprii, în toate modurile, structura prezintă forme de deformare în zona inferioară a tronsoanelor – în imediata vecinătate a îmbinării.

În acest capitol se prezintă și aplicarea metodei elementelor finite la evaluarea elementelor metalice și a îmbinărilor sudate cu fisuri, ca premise pentru capitolul 6.

Capitolul 5

Capitolul 5 prezintă în mod detaliat experimentele realizate pentru determinarea caracteristicilor de material și a parametrilor mecanicii ruperii, teste ce includ: analize chimice de material pentru determinarea compoziției chimice a oțelului, teste pentru determinarea rezistenței la întindere a oțelului, teste de tip Charpy pentru determinarea rezilienței, curba integralei J și a vitezei de propagare a fisurii.

Testele de laborator și măsurătorile au fost realizate la Facultatea de Inginerie Mecanică din cadrul Universității din Belgrad și de asemenea în cadrul Universității Politehnice Timișoara.

În urma rezultatelor testelor au fost realizate calcule complexe de mecanica ruperii și oboseala în capitolul 6.

Capitolul 6

Integritatea structurală și evaluarea duratei de exploatare rămasă pentru o structură, pot fi considerate deziderate obligatorii în calculul, proiectarea și fabricarea elementelor structurilor metalice.

Capitolul 6 prezintă proceduri de determinare a acceptabilității defectelor pe baza rezistenței la rupere cu metode de evaluare de cedare (Failure Assessment Diagrams – FAD1 și FAD2), ce pot fi aplicate pentru orice tip de structură cu pereți curbi subțiri (shell) cu îmbinări de tip sudat. Au fost considerate mai multe zone de aplicare a defectelor – de la defect/fisură în peretele elementului (ex.: în peretele elementului de tip shell sau în placa de capăt a îmbinării), până la defect de tip fisură circumferențială în elementul de tip placă curbă subțire.

Evaluarea a fost realizată utilizând normativul BS7910 / 2013. Astfel, pentru nivelul 1 de evaluare, au fost considerate zece tipuri de defecte. Rezultatele au fost prezentate sub forma de nivel de acceptabilitate pentru fiecare defect în parte, prin grafice comparative, determinându-se și dimensiunile critice ale defectelor.

Abordarea de evaluare sub nivel 2 (FAD-2) este făcută pentru 43 de defecte ale elementelor de tip shell. Pentru fiecare defect a fost trasată diagrama de evaluare a cedării (FAD-2) (rezultate prezentate în Anexa 3). Au fost realizate grafice comparative între grupuri de defecte posibil decelate, astfel determinându-se defectele critice de tip fisură. Pentru fiecare defect, conform nivelului 2, s-a calculat valoarea critică a dimensiunilor defectului.

O contribuție importantă a tezei este realizată în Capitolul 6, prin prezentarea unei proceduri de determinare a siguranței în exploatare pentru structurile de tip shell utilizând abordarea ECA (Engineering Critical Assessment) – abordare realizată pe baza principiilor mecanicii ruperii. Metodologia stabilește reguli clare pentru evaluarea elementelor structurale metalice cu defecte, cu decelarea defectelor /fisurilor inițiale, evaluarea acestora și stabilirea dimensiunilor critice ale fisurilor.

În acest capitol este prezentat un calcul detaliat la oboseala a elementelor de tip shell solificate la sarcini de tip ciclic. Utilizând software-ul CrackWise sunt prezentate evaluări ale structurilor de tip shell cu aplicarea principiilor mecanicii ruperii prin aplicarea directă – studiu de caz descris și calculat din punct de vedere al rezistenței și stabilității la capitolul 4.

Pentru evaluarea la oboseala a structurii, este prezentată o evaluare detaliată a încărcării din vânt – ciclurile de încărcare au fost considerate conform datelor prezentate de Institutul de Meteorologie și Hidrologie din România. Cinci analize structurale au fost realizate – pentru cinci cazuri de încărcări și au fost evaluate (FEM) pentru fiecare caz, tensiunile în zona critică – îmbinare tronson $t=16\text{mm}$ cu tronson $t=20\text{mm}$. Utilizând un algoritm de tip Rainflow, rezultatele au fost procesate și au fost astfel determinate blocuri de tensiuni cu ecarturi de tensiuni și frecvența apariției acestora.

Abordarea de tip ECA pe baza principiilor mecanicii a fost aplicată pentru cele 43 de tipuri de defecte, utilizând tensiunile rezultate în urma analizelor structurale, rezultând numărul de ani până la cedare. Pentru defectele de tip placă plană (FP) au fost făcute mai multe evaluări ale dimensiunii B – lățimea zonei de aplicare a tensiunii maxime/de calcul considerate în evaluare. Astfel aceasta dimensiune a fost mărită de la 200mm la 500mm și apoi la 1000mm, considerând un mod de redistribuire a tensiunii în peretele elementului de tip shell.

Pentru fiecare defect posibil decelat a fost aplicată metoda ECA și au fost prezentate rezultatele în mod grafic, indicând astfel durata / numărul de ani până la cedare a elementului (rezultatele sunt prezentate detaliat în Anexa 4). Toate rezultatele au fost comparate și au fost prezentate defectele critice – cu cel mai mic număr de ani până la cedare.

Pe baza procedurilor detaliate prezentate la Capitolul 6, a concluziilor făcute pentru fiecare tip de defect, metodele de evaluare prezentate pot fi aplicate foarte ușor în proiectarea curentă cu caracteristici de material diferiți.

Prezentul studiu este bazat pe rezultatele experimentale realizate la Facultatea de Inginerie Mecanica a Universității din Belgrad și a Universității Politehnica Timișoara pentru determinarea caracteristicilor și parametrilor de material necesari. Astfel au fost determinați parametrii de tip K , J , δ .

Contribuțiile personale prin prezenta teză sunt următoarele:

- Abordarea cu ajutorul principiilor mecanicii ruperii a evaluării structurilor de tip shell
- Calculul cu ajutorul Metodei Elementelor Finite (FEM) a unei structuri de tip shell și compararea rezultatelor cu rezultatele obținute în urma unui calcul semi analitic realizat cu ajutorul normativului EN1993-1-6;
- Cercetare experimentală pentru determinarea caracteristicilor mecanicii ruperii pentru un caz dat real, inclusiv prezentarea metodelor de test;
- ECA – evaluarea cu ajutorul mecanicii ruperii a structurilor de tip shell – premisă în calcul și expertizare – determinarea duratei de viața a structurilor

Principalele caracteristici ale abordării de tip ECA prezentate în această teza sunt:

- Siguranță marită în exploatarea structurilor metalice de tip shell
- Determinarea și definirea intervalelor de inspecție pentru o structura de tip shell
- Controlul riscului cedării structurale
- Evaluarea duratei de exploatare a structurilor de tip shell

ECA reprezintă un nou trend în evaluarea structurilor metalice, trend ce va evolua de la calculul structurii la fabricarea acesteia.

Diseminarea rezultatelor cercetării a fost realizată prin publicarea a două articole în reviste internaționale cotate ISI Web of Science, un articol publicat în volumul unei conferințe internaționale indexată ISI și un număr de zece articole publicate în reviste și volume ale unor manifestări științifice indexate BDI.

Bibliografie (selecție)

- [1.1] Philippa Moore, Geoff Booth, “*The Welding Engineer’s Guide to Fracture and Fatigue*”, Wood Publishing, 2015
- [1.2] ***, ISO 5817 standard – “*Arc welding joints in steel, guidance on quality levels for imperfections*”
- [1.3] Easterling, K. – “*Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*”, Second Edition, Butterworth-Heinemann 1992
- [1.4] ***, The Alexander L. Kielland accident, Report of a Norwegian public commission appointed by royal decree of March 28, 1980, presented to the Ministry of Justice and Police March, 1981 ISBN B0000ED27N
- [1.9] S. Sedmak, A. Sedmak, "Fracture Mechanics and Non-Destructive Testing for Structural Integrity Assessment ", Key Engineering Materials, Vol. 399, pp. 27-36, 2009

- [2.11] Anderson, T. L. "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications", Third Edition. CRC Press, 2005
- [2.12] Wells, A.A., "Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture" Proceedings of the Crack Propagation Symposium, Vol. 1, Paper 84, Cranfield, UK, 1961.
- [2.13] Rice, J.R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks." Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, 1968, pp. 379–386.
- [2.14] Ashok Saxena, "Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers", CRC Press; 1 edition (March 31, 1998)
- [2.15] Paris, P.C., Gomez, M.P., and Anderson, W.P., "A Rational Analytic Theory of Fatigue" The Trend in Engineering, Vol. 13, 1961, pp. 9–14.
- [2.16] Paris, P.C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws" Journal of Basic Engineering, Vol. 85, 1960, pp. 528–534
- [2.21] ***, EN-1993:2006, *Steel structures design. Part 1-9: Fatigue design*, CEN – European Committee for Standardization
- [2.22] Matsuishi, M. and Endo, T., *Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress*, Proc. Japan Soc. of Mech. Engrs., n. 68-2, 1968, pp. 37-40.
- [2.23] Dowling, N.E., *Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-strain Histories*, J. of Materials, v.7, n.1, Mar., 1972, pp. 71-87.
- [2.25] Petzek, E., "Elaborarea de instrucțiuni pentru aplicarea principiilor mecanicii ruperii la stabilirea siguranței în exploatare și a duratei de viața rămasă a podurilor metalice existente", Editura Orizonturi Universitare, Timișoara 2006
- [2.26] Dumitru, I., Marșavina, L., "Introducere în mecanica ruperii", Ed. Mirton, Timișoara 2001
- [2.27] Johnson, H.H, Paris, P.C., Subcritical Flaw Growth", Engineering fracture mechanics, 3/1968
- [2.28] Pană. T., "Aplicații inginerești ale mecanicii ruperii", Editura Tehnică București 1974
- [2.30] Dobrojević, M., et al, Sedmak, A., „Micromechanical analysis of constraint effect on fracture initiation in strength mismatched welded joints“, Materials Science Forum 555, pp. 571-576, 2007
- [2.31] Milović, Lj., Sedmak, A., et al, „Numerical and analytical modeling of elastic-plastic fracture mechanics parameters“, Materials Science Forum 555, pp. 565-570, 2007
- [2.32] Rakin, M., Gubelj, N., Dobrojević, M., Sedmak, A. "Modelling of ductile fracture initiation in strength mismatched welded joint" Engineering Fracture Mechanics Vol. 75 (11), pp. 3499-3510 2008
- [2.33] Sedmak, S., Sedmak, A. "Fracture mechanics and non-destructive testing for structural integrity assessment" Key Engineering Materials, Vol. 399, pp. 27-36 2009
- [2.34] ***, EN 1991 *Action on structures – Part 1-4 – Wind load*, CEN – European Committee for Standardization
- [2.35] ***, IEC 61400-1, *Wind turbines. Part 1 – Design requirements*, International Electrotechnical Commission
- [2.37] Maddox, S.J., "Fatigue Strength of Welded Structures", Cambridge, Abington Publishing 1991
- [2.38] Palmgren, A.G. (1924): *Die Lebensdauer von Kugellagern* (Life Length of Roller Bearings. In German). Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (VDI Zeitschrift), ISSN 0341-7255, Vol 68, No 14, April 1924, pp. 339–341
- [2.39] B. F. Langer: *Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude*. In: *Journal of Applied Mechanics*. Band 59, 1937, S. A160–A162.
- [2.40] M. A. Miner: *Cumulative damage in fatigue*. In: *Journal of applied mechanics*. Band 12, Nr. 3, 1945, S. 159–164.
- [3.1] ***, Eurocode 1993 - *Design of steel structures, part 1-1: General rules*, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2006
- [3.2] ***, Eurocode 1993 - *Design of steel structures, part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures*, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2006
- [3.3] ***, Eurocode 1991 - *Action on structures, part 1-4: Wind load*, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2006

- [3.4] ***, Eurocode 1993 - *Design of steel structures, part 1–8: Joints design*, European Committee for Standardisation (CEN)., Brussels; 2006
- [3.5] ***, ECCS – European Conventions for Constructional Steelwork, “Buckling of Steel Shells – European Design Recommendations”, 2013
- [3.6] Das, P., Thavalingam, A. and Bai, Y., “*Buckling and ultimate strength criteria of stiffened shells under combined loading for reliability analysis*”, *Thin-walled structures* 41(1): 69-88, 2003
- [3.7] Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S., “*Theory of plates and shells*”, Vol. 2, McGraw-hill New York, 1959
- [3.8] Timoshenko, S. and Gere, J., “*Theory of elastic stability*”, McGraw-hill New York, 1961
- [3.9] Gerard, G. and Becker, H. (1957). “*Handbook of structural stability part III: buckling of curved plates and shells*” Technical note, 3783.
- [3.10] J.G. Teng, J.M. Rotter – “*Buckling of thin metal shell*” – Spon Press (2001)
- [3.11] Rotter, J.M., “*Shell buckling design and assessment – the LBA-MNA methodology*”, *Stahlbau* – October 2011 (pp. 791-803)
- [3.13] D. Radu, A. Sedmak, “*Welding joints failure assessment – Fracture mechanics approach*”, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*, Vol.x.-2016, Series I: Engineering Sciences
- [3.14] D. Radu, A. Sedmak, “*Failure modes and designing procedures of the tubular truss beams welded joints according with EN 1993-1-8*”, *Proceedings of The International Scientific Conference CIBv 2014*,
- [3.15] Bancila R., Feier A., Radu D., “*Rehabilitation of existing steel structures, an integral part of the sustainable development*”, *Proceedings of The International Scientific Conference CIBv 2014*,
- [3.16] D. Radu, TF. Galatanu, “*Aspects on designing the truss elements welded joints*”, *Transilvania University Press Brasov*, *Proceedings of The International Scientific Conference CIBv 2015*
- [3.17] Radu D., „*Manufacturing imperfections importance in rectangular hollow section welded joints behaviour*”, *SGEM2015 Conference Proceedings*, ISBN 978-619-7105-33-9 / ISSN 1314-2704, June 18-24, 2015, Book1 Vol. 3, 895-902 pp
- [4.5] Henshell, R. D., Shaw, K.G., “*Crack tip finite elements are unnecessary*”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 9, Issue 3, Pages 495-507, 1975
- [4.6] Barsoum, R. S. (1974). Application of Quadratic Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics. *International Journal of Fracture*, 10, 603-605.
- [4.7] Barsoum, R. S. (1976). Application of Triangular Quarter-Point Elements as Crack Tip Elements of Power Law Hardening Material. *International Journal of Fracture*, 12, 463-466.
- [4.8] Banks-Sills, L. and Bortman, Y. “*Reappraisal of the quarter-point quadrilateral element in linear elastic fracture mechanics*”, *International Journal of Fracture*, 25, 169–180, 1984.
- [4.9] Kundu, T., “*Fundamentals of Fracture Mechanics*”, CRC Press, 2008
- [4.10] Radu D., „*Manufacturing imperfections importance in rectangular hollow section welded joints behaviour*”, *SGEM2015 Conference Proceedings*, ISBN 978-619-7105-33-9 / ISSN 1314-2704, June 18-24, 2015, Book1 Vol. 3, 895-902 pp
- [5.1] ***, EN10045 – 1 - “*Metallic materials — Charpy impact test, Part 1: Test method*”, CEN
- [5.6] ***, BS 7448-1:1991 - *Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*”
- [6.1] ***, BS 7910 / 2013, “*Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*”, BSI British Standards
- [6.2] M.F. Kanninen and C.H. Popelar, “*Advanced Fracture Mechanics*”, Oxford University Press, 1985
- [6.3] R.H.Leggatt, „*Residual stresses in welded structures*”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85(3):144-151 · March 2008
- [6.6] A. Sedmak, S. Sedmak, Lj. Milović, “*Pressure Equipment Integrity Assessment by Elastic-Plastic Fracture Mechanics Methods*”, DIVK, 2011
- [6.7] Manjgo, M., et al, Sedmak, A., “*Analysis of welded tensile plates with a surface notch in the weld metal and heat affected zone*” *ENGINEERING FRACTURE MECHANICS* Vol. 77 No.15, pp. 2958-2970 2010

- [6.10] Lungu D., van Gelder P., Trandafir R., 1996. *Comparative study of Eurocode 1, ISO and ASCE procedures for calculating wind loads*. IABSE Colloquium, Basis of Design and Actions on Structures, Background and Application of EUROCODE 1. Delft University of Technology, March 27-29, p.345-354
- [6.11] INMH – wind load data in 2011, 2012 and 2013
- [6.12] TWI CrackWise Software ver.5.0 – Documentation
- [6.13] D. Radu, A. Sedmak, “*Design of cylindrical shell steel structures with billboard tower as the case study*”, TEAM2015 Conference, Belgrade 2015.
- [6.14] A. Sedmak, D.Radu, “*Truss beams welded joints – manufacturing imperfections and strengthening solutions*”, DIVK Society for Integrity and life of Structures Journal Vol.14, No1, 2014, pp.29–34
- [6.15] ***, EN 1090-2, “*Technical requirements for the execution of steel structures*”, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels