

CERCETĂRI CU PRIVIRE LA APLICAREA METODELOR NUMERICE PENTRU UN ECHIPAMENT CILINDRIC CU GROSIME VARIABILĂ SOLICITAT LA PRESIUNE INTERIOARĂ

RESEARCH ON THE APPLICATION OF NUMERICAL METHODS FOR A CYLINDRICAL EQUIPMENT OF VARIABLE THICKNESS LOADED AT INTERNAL PRESSURE

Gheorghe-Cosmin CIOCOIU¹, Ion DURBACĂ¹, Nicoleta SPOREA¹, Georgiana Luminița ENĂCHESCU¹, Georgiana-Daniela (Oprea) FLINTAȘU²

¹ Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București – Romania

E-mail autor: cgcocmin@gmail.com, ion.durbaca@yahoo.com, nsporea@yahoo.com,
luminitageorgianaenachescu@gmail.com

² Distrigaz Sud Rețele SRL – Romania

E-mail autor: georgianadanif@yahoo.com

Rezumat. *Lucrarea prezintă rezultatele analizei numerice obținute în urma utilizării metodei elementului finit (MEF), efectuată pe un corp cilindric cu geometrie variabilă, solicitat la o presiune interioară, $p = 3 \text{ MPa}$. Lucrarea de față ia în discuție cazul unei treceri fără racordare de la o grosime a peretelui la una mai redusă, caz în care se investighează valorile deformațiilor liniare specifice și tensiunile corespunzătoare. În acest scop, a fost realizat un model geometric construit în Inventor Professional și apoi importat în Nastran In-CAD pentru calculul MEF al obiectului.*

Cuvinte cheie: *Tensiuni, deformații, metoda elementului finit (MEF)*

Abstract. *This paper presents the results of the numerical analysis obtained using the finite element method (FEM), performed on a cylindrical body with variable geometry, loaded at an internal pressure, $p = 3 \text{ MPa}$. The present paper considers the case of an uncooled transition from a wall thickness to a smaller wall thickness, in which case the values of the specific linear deformations and the corresponding stresses are investigated. For this purpose, a geometrical model built in Inventor Professional and then imported into Nastran In-CAD for the finite element method calculation of the object.*

Key words: *stress, strain, finite element method (FEM)*

1. Introducere

Echipamentele industriale, cum ar fi conductele, recipientele sub presiune etc, sunt utilizate pe scară largă în industriile de proces și sunt realizate cu o configurație constructivă deosebit de complexă, caracteristică fiecărui caz practic [1-3]. Datorită materialelor utilizate în procesul de fabricare ale echipamentelor, nu de puține ori trebuie să se apeleze la o geometrie variabilă a pereților (grosimi diferite). Ca urmare, în zonele respective și în porțiunile învecinate este necesar să se analizeze starea de solicitări în vederea evaluării echipamentului.

În timpul fabricării și montării echipamentelor, pot apărea defecte în material, care influențează capacitatea portantă a structurii. În acest sens, studiile analitice și experimentale ale solicitărilor rezultate din sarcini tranzitorii sunt limitate la geometrii simple și condiții limită simplificate. Prin urmare, datele numerice pentru confruntarea cu aceste modele sunt o necesitate, în special atunci când nu sunt disponibile soluții analitice [4-9].

Datorită faptului că fluidul de lucru în instalațiile chimice și petrochimice are, în general, agresivitate chimică sau erozivă ridicată, în asociere cu parametri ridicați de temperatură și de presiune, pot apărea defecte de suprafață [10-15] și discontinuități geometrice [16-22] situate la interiorul sau la exteriorul echipamentelor. De asemenea, concentrațiile de tensiuni [20] pot fi cauzate de discontinuitățile geometrice. Acestea pot afecta performanța și siguranța echipamentelor în timpul funcționării, în funcție de gravitatea defectului și de utilizarea pentru care a fost proiectată structura echipamentului. În unele cazuri, defectele apărute pot duce la scurgeri, rupturi sau alte eșecuri ale structurilor. Din aceste motive, este deosebit de important să existe inspecții regulate ale echipamentelor pentru cuantificarea și evaluarea cu atenție nu numai a formelor (design tehnic) și a combinațiilor geometrice propuse asupra stărilor de tensiuni acceptabile, dar și eventualele deteriorări manifestate pe parcursul vieții structurii mecanice sub presiune. Totodată, pentru a preîntâmpina eventualele defecte, componentele deteriorate trebuie să fie reparate sau înlocuite după cum este necesar, pentru a se asigura funcționarea în condiții de siguranță în scopul protejării mediului înconjurător.

În domenii complexe majoritatea problemelor apar din punct de vedere geometric și pot avea condiții limită diferite. Din acest motiv, găsirea unei soluții analitice este de obicei imposibilă sau cel puțin dificilă, ceea ce necesită utilizarea metodelor aproximative. De asemenea, generarea de funcții de aproximare necesare în metodele tradiționale poate fi dificilă. Un răspuns la aceste probleme este utilizarea metodei elementului finit, care poate furniza soluții precise și rapide pentru astfel de probleme complexe [24-26].

Modelarea cu element finit se utilizează în prezent pe scară largă în mediul academic și industrial. Aplicațiile folosite în sprijinul proiectării și evaluării rezistenței diverselor structuri mecanice reprezintă o bază pentru funcționarea în condiții de siguranță a acestora [24-26]. Analiza prin această metodă este o componentă integrantă și majoră în multe domenii de proiectare și de fabricare inginerescă. Industrii consacrate, majore, cum ar fi automobilele, industria aerospațială, chimică, farmaceutică, petrolieră, electronică și comunicații, precum și tehnologiile emergente, cum ar fi nanotehnologia și biotehnologia, se bazează pe această metoda pentru a simula fenomene complexe la diferite scări în vederea proiectării și fabricării produselor de înaltă tehnologie [7, 27-29].

Scopul lucrării constă în analiza numerică cu metoda elementului finit (MEF) efectuată pe un corp cilindric cu geometrie variabilă, solicitat la o presiune interioară. Lucrarea de față ia în discuție cazul unei treceri fără racordare de la o grosime a peretelui la una mai redusă, caz în care se investighează valorile deformațiilor liniare specifice și tensiunile corespunzătoare. În acest scop, a fost realizat un model geometric construit în Inventor Professional și apoi importat în Nastran In-CAD pentru calculul MEF al obiectului.

2. Conținutul lucrării

Modelarea cu element finit a corpului cilindric a fost efectuată cu ajutorul a două programe de modelare (*ANSYS* și *NASTRAN*). Rezultatele pentru tensiunile echivalente Von Mises au fost aproximativ egale, ceea ce ne demonstrează că modelarea a fost corectă și au validat rezultatele experimentale obținute în lucrarea [30].

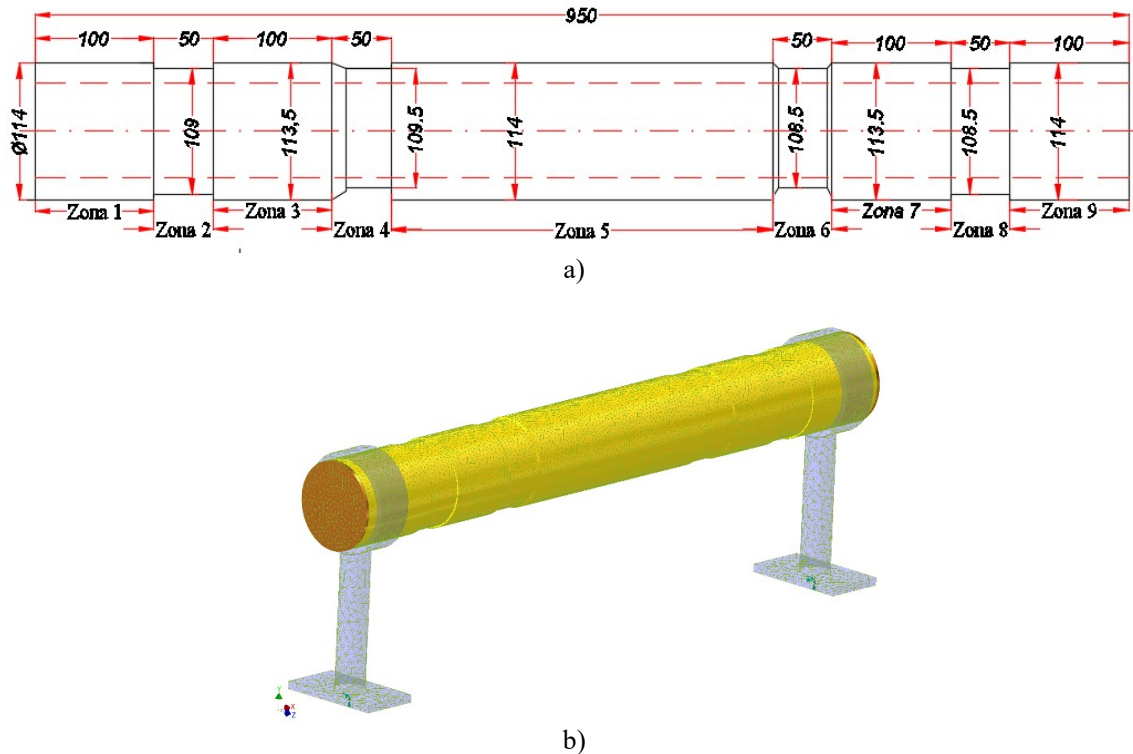


Fig. 1. Modelul geometric - a) schița modelului; - b) modelul geometric construit în Inventor

Procedura de utilizare a MEF constă în: modelare, discretizare, determinarea condițiilor limită și calcul [31]. Modelul geometric poate fi construit fie direct în programul de modelare, fie într-un software profesional de desen (de ex.: *Inventor*, *Solid Works*, etc).

În această lucrare, modelul geometric (figura 1b) a fost construit în *Inventor Professional* și apoi, pentru calculul MEF, a fost importat în *Nastran In-CAD*, un soft-ware utilizat pentru analiza structurilor în vederea simulării comportamentului în condițiile aplicării unei presiuni interioare [32]. Pentru calculele stărilor limită, s-a utilizat MEF neliniar *ANSYS*.

Date inițiale:

- s-a considerat materialul modelului ca fiind P265GH, având simbolizarea 1.4025, conform SR EN 10216;
- dimensiunile și geometria modelului sunt prezentate în fig. 1-a;
- modelarea modelului este indicată în fig. 1-b;
- s-a considerat că modelul analizat se comportă perfect liniar/elastic.

Stabilirea contactelor este o etapă esențială în analiza ansamblurilor, iar în acest sens, în situația dată, contactele dintre suporturi și țeavă s-au considerat a fi de tipul “Sliding/No Separation” (se comportă ca un element sudat, la solicitări de tracțiune/compresiune, dar pot aluneca una față de alta în planul de contact) iar contactul dintre capace și țeavă au fost definite ca “Bonded” (echivalentul componentelor sudate) [32].

Constrângerile au fost definite pe tălpile suporturilor (unul de tip “structural fixed” – 6 grade de libertate anulate și unul de tip “structural” cu 5 grade de libertate anulate, fiind permisă numai translația axială pe axa X).

Part Name	Visibility	Color	Size (mm)	Tolerance (mm)	Element Order	Settings	Nodes	Elements
Ansamblu 2.i...	☒		38,4778	0,000769555	Parabolic	Settings	0	0
Capac_24.03....	☒		6,05416	0,000121083	Linear	Settings	4421	2327
Capac_24.03....	☒		6,05416	0,000121083	Linear	Settings	753	2478
Model_rev.1:1	☒		5,5	0,00072112	Parabolic	Settings	171203	98631
Suport:1	☒		13,2618	0,000265237	Linear	Settings	725	2216
Suport:2	☒		13,2618	0,000265237	Linear	Settings	711	2143

Fig. 2. Discretizare model geometric

Discretizarea modelului geometric s-a făcut cu elemente solide, după metoda tetraedrală, cu laturi parabolice pentru țeavă și liniară pentru restul componentelor, cu dimensiunile prezentate în figura 2.

Încărcarea este dată de presiunea interioară, $p = 3\text{ MPa}$, și s-a impus condiția de asigurare a unei convergențe a rezultatelor $< 2\%$. Această cerință permite automatizarea procesului de rafinare a rețelei discretizate în timpul procesului de evaluare. În acest caz s-a impus o rafinare globală în 5 pași ("global refinement") care va permite modificarea dimensiunii elementului finit pe întregul volum al piesei.

Rezultate și discuții

Tensiunile echivalente **von Mises** (calculate pe baza tensiunilor principale) obținute cu ajutorul MEF, în diferite secțiuni, prezintă un maxim de 76.6 MPa în zona capacului, dar pe țeavă se obțin tensiuni $< 25\text{ MPa}$ în zonele de grosime mai mică și $13\cdots 18\text{ MPa}$ în zonele de grosime mai mare (fig. 3.).

Tensiunea von Mises este o mărime scalară care poate fi comparată cu limita de curgere a materialului, determinând în acest fel coeficientul de siguranță.

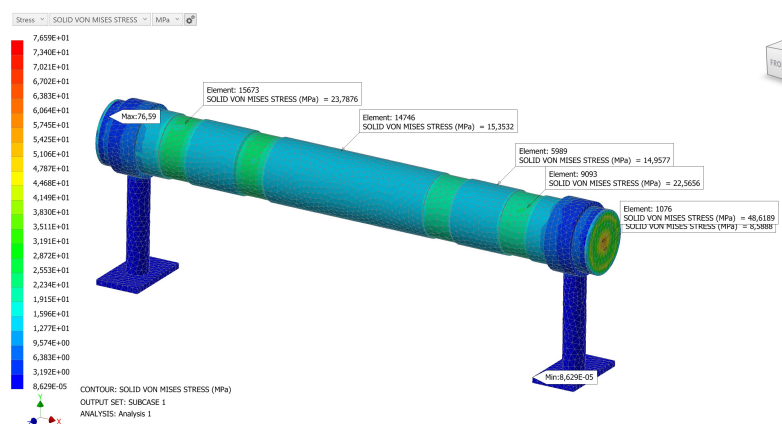


Fig. 3. Valorile tensiunilor echivalente

Deplasarea (Displacemet) indică deplasarea nodurilor față de poziția originală, ca răspuns la o sarcină aplicată. Deplasările totale sunt de max 0.048 mm (crescătoare către capătul în care suportul se poate deplasa axial).

Cercetări cu privire la aplicarea metodelor numerice pentru un echipament cilindric cu grosime variabilă solicitat la presiune interioară

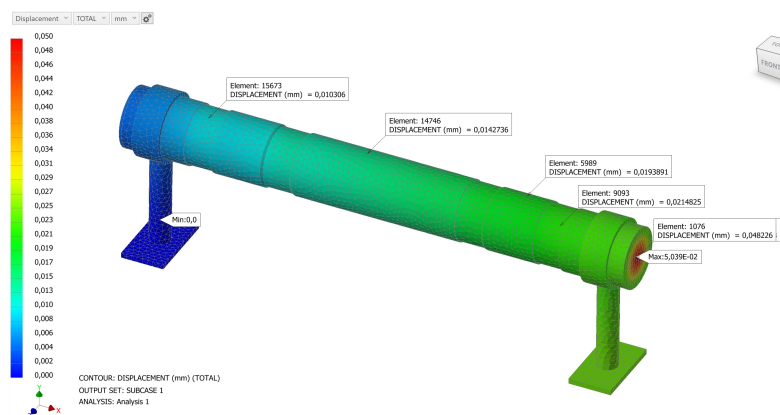


Fig. 4. Valorile deformațiilor specifice liniare

Tensiunile echivalente **von Mises** variază de la 21.91 MPa la exterior la 27.45 MPa la interior (fig. 5) în secțiunea transversală prin țevă (în zona de grosime 5.5 mm), iar în lungul modelului variază între 21.98 MPa și 23.87 MPa (fig. 6).

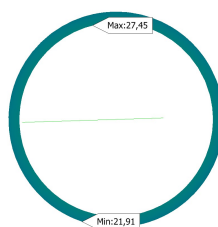


Fig. 5. Valorile tensiunilor echivalente în secțiune

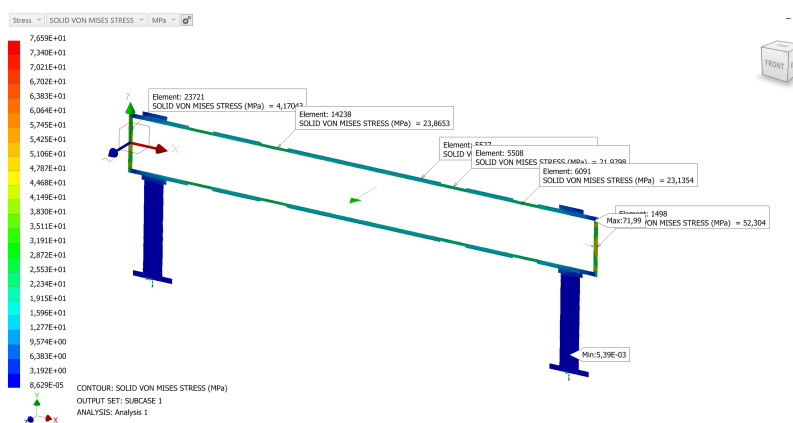


Fig. 6. Valorile tensiunilor von Mises în lungul modelului

Rezultate experimentale

Linia de tensiuni – concept specific recipientelor sub presiune [32] permite generarea unui grafic al tensiunilor de-a lungul unei linii drepte definite (stress classification line) pe generatoarea țevii (fig. 7).

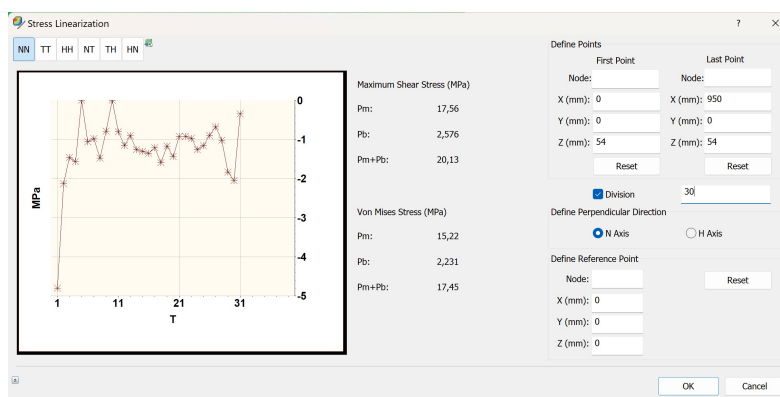


Fig. 7. Liniarizarea tensiunilor pe generatoare

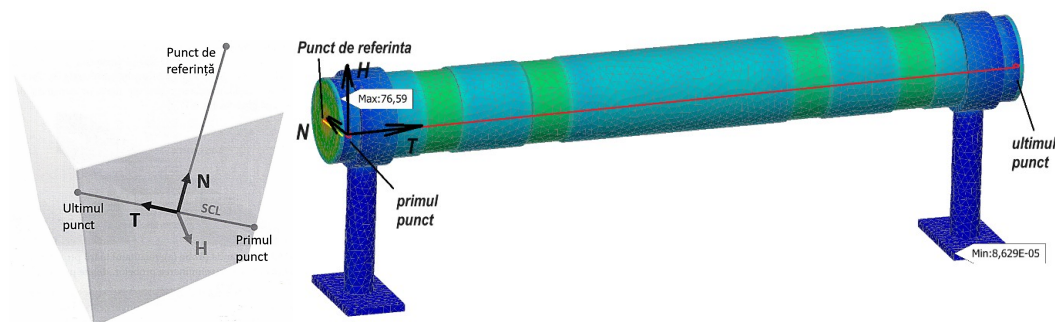


Fig. 8. Trasarea SCL și orientarea axelor T , H și N [4]

Cercetări cu privire la aplicarea metodelor numerice pentru un echipament cilindric cu grosime variabilă solicitat la presiune interioară

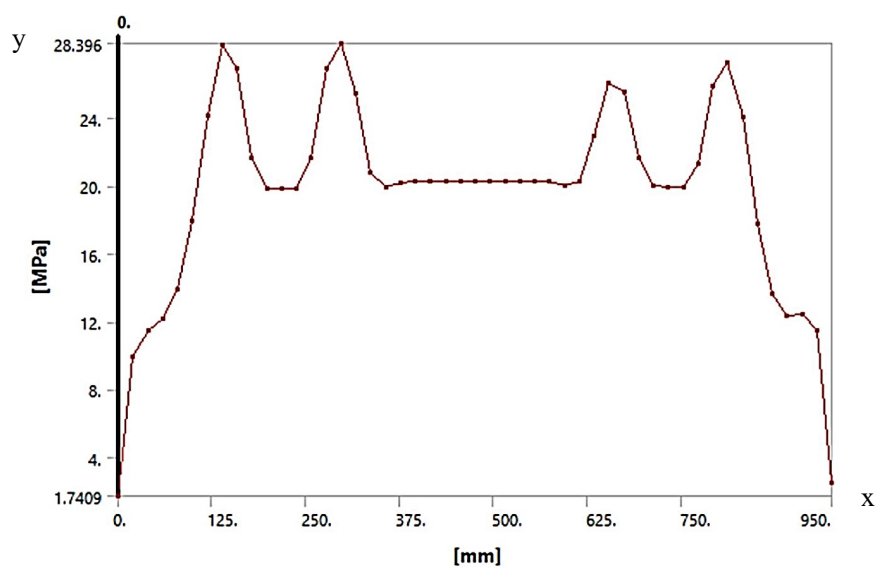
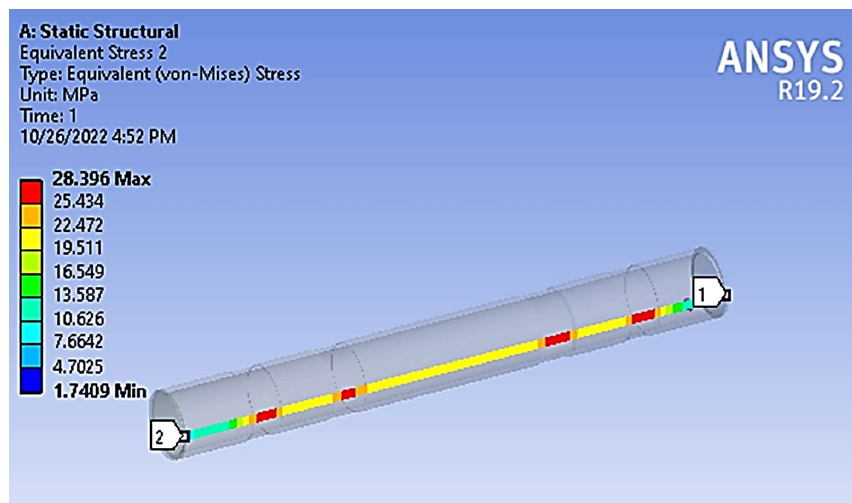


Fig. 9. Valorile tensiunilor echivalente în punctele aflate pe generatoarea exterioară

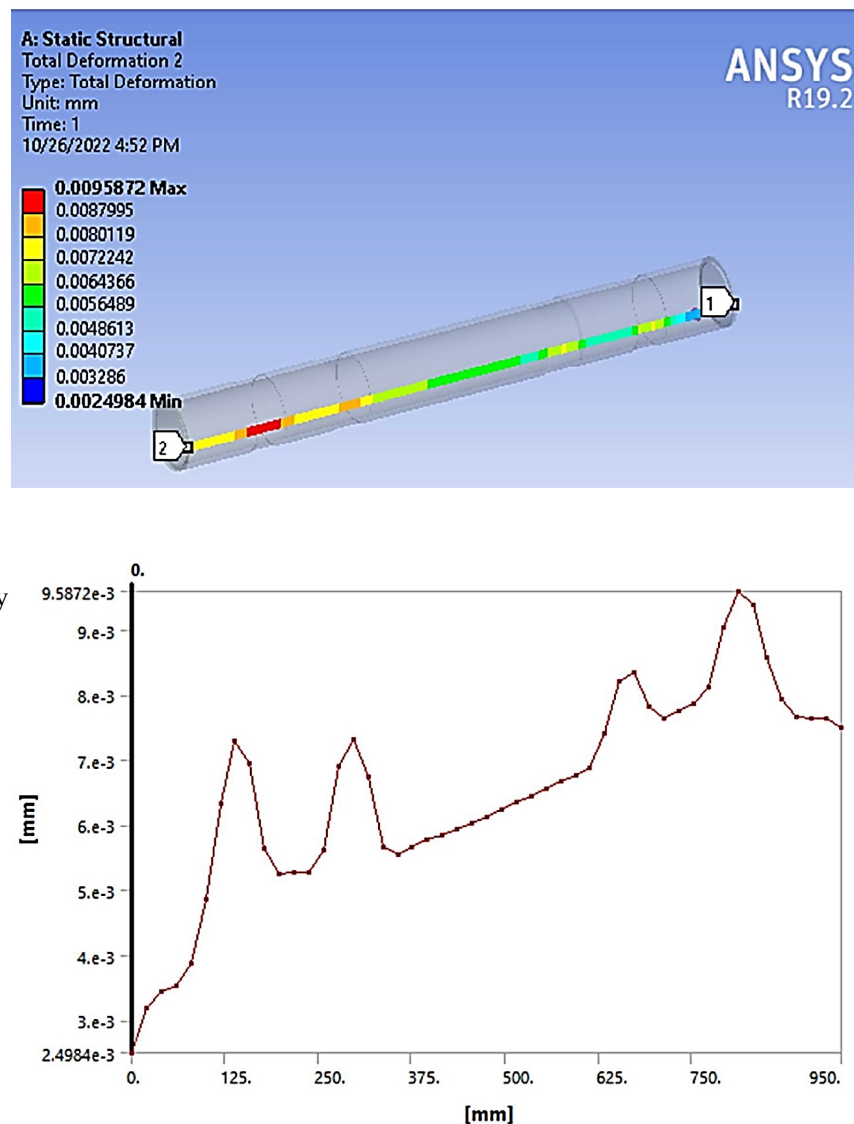


Fig. 10. Valorile deformațiilor specifice în punctele aflate pe generatoarea exterioară

Concluzii

Direcțiile tensorilor se raportează la un sistem local de coordonate dat de cele două puncte selectate pe linia indicată prin coordonatele capetelor (x, y, z - în acest caz 0, 0, 54 și 950, 0, 54) și un al treilea punct - de referință, specificat de utilizator (în acest caz 0, 0, 0).

Liniarizarea permite determinarea tensiunii principale în membrană, Pm (primary membrane stress) și a tensiunii de îndoire Pb (primary bending stress) care însumate dau tensiunea totală ($Pm + Pb$).

Determinarea celor trei direcții perpendiculare pe baza cărora se calculează tensorii: axa pozitivă T este data de linia SCL , de la primul la ultimul punct. Punctul de referință dă axa N , iar axa H va fi perpendiculară pe planul TN în punctul de intersecție al axelor, cu sens pozitiv dat de regula mâinii drepte [32].

Tensorul NN este tensiunea normală în direcția locală N , iar TH este tensiunea de forfecare de-a lungul planului NH , în direcția H .

Pentru o evaluare mai exactă a tensiunilor, pe o generatoare a țevii s-a făcut o nouă verificare cu elemente finite cu softul *ANSYS*. Acesta oferă soluții de discretizare superioare și, suplimentar, soluții de vizualizare a rezultatelor în nodurile aflate pe generatoarea interioară sau exterioară [25,26]. Setările parametrilor de analiză au fost similari (aceleași tipuri de constrângeri și contacte, corpul solicitat de presiunea interioară, $p = 3\text{MPa}$), discretizare cu 165782 elemente finite și 281462 noduri, convergența rezultatelor $< 2\%$. Prin rezolvarea modelului cu metoda elementului finit, în nodurile aflate pe generatoarea exterioară s-au obținut valori ale tensiunilor echivalente von Mises (tensiunea maximă este de 28.39MPa în zonele cu grosime mai mică) și deplasărilor ($95.87 \times 10^4 \mu\text{m}/\text{m}$).

Modelul geometric prezentat poate fi baza pentru o analiză ulterioară, se sugerează utilizarea așa-numitei abordări hibride, combinând metoda analitică cu metoda elementului finit. Acest lucru permite identificarea stării de tensiuni și deformații în timpul încărcărilor dinamice și în orice punct ales al structurii.

Scopul lucrării este de a remarcă efectul discontinuităților geometrice de structură asupra stării de tensiuni, în diferite secțiuni. În acest sens a fost realizat un model geometric experimental cu secțiuni cu grosimi diferite și treceri variate (trecere bruscă și trecere cu variație liniară) [30].

În timp ce tensiunea echivalentă teoretică este constantă pe lungimea zonelor considerate, tensiunile echivalente experimentale au valori diferite. Se remarcă în acest fel, influența discontinuităților geometrice. Pentru un studiu mai detaliat, se poate analiza efectul racordărilor dintre elementele constructive adiacente asupra concentrării tensiunilor. În acest mod se poate stabili siguranța în funcționarea unui echipament sub presiune de tip corp cilindric, la proiectarea sau pe parcursul funcționării. Se poate evalua durata reală de funcționare, într-un caz dat, ținându-se seama și de eventualele modificări de grosimi ale pereților elementelor geometrice.

Referințe

- [1] N. Zhangabay, U. Suleimenov, A. Utebayeva, S. Buganova, A. Tolganbayev, K. Galymzhan, S. Dossybekov, K. Baibolov, Roman Fediuk, Mugahed Amran, Bolat Duissenbekov, Aleksandr Kolesnikov, Experimental research of the stress-strain state of prestressed cylindrical shells taking into account temperature effects, *Case Studies in Construction Materials*, 18, 2023
- [2] Teixeira M. Jr., Zilio G., Mortean M.V.V., Paiva K.V., Oliveira J.L.G., Experimental and numerical analysis of transient thermal stresses on thick-walled cylinder, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 202 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104884>
- [3] Moustabchir H., Arbaoui J., Azari Z., Hariri S., Pruncu C. I., Experimental / numerical investigation of mechanical behaviour of internally pressurized cylindrical shells with external longitudinal and circumferential semi-elliptical defects, *Alexandria Engineering Journal*, 57, (3), 2018, Pages 1339-1347
- [4] Ghasemi H., Hamdia K. M., The J-Integral Method Compared to the API 579-1/ASME FFS-1 Standard to Calculate Stress Intensity Factor (SIF): Leak-Before-Break (LBB) Application with Uncertainty Quantification, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08138-4>
- [5] Zhu Y., Lu D., Liu Y., Li D., Equivalent mechanical model for liquid sloshing in irregular annular cylindrical containers of liquid metal reactors, *Annals of Nuclear Energy* 201 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110425>
- [6] Shan C., Sun J., Jia X., Wu R., Lu X., The mechanical behavior of cylindrical shell with composite corrugations under uniform and concentrated pressure, *Ocean Engineering* 298 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117148>
- [7] Lai A., Jia J., Zhou Z., Xu X., Lim C.W., Homotopic analysis for post-buckling of cylindrical shells with local thickness defects, *Acta Astronautica* 193 (2022) 44–55, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.005>

- [8] Xu S., Wang W., Y Chang., Using FEM to predict residual stresses in girth welding joint of layered cylindrical vessels, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 119 (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2014.02.002>
- [9] Ghavamian A., Mustapha F., Baharudin B.T.H.T., Yidris N., Detection, Localisation and Assessment of Defects in Pipes Using Guided Wave Techniques: A Review, doi:10.3390/s18124470, *Sensors* 2018, 18, 4470.
- [10] Liu, C., Dobson, J., Cawley, P., Efficient generation of receiver operating characteristics for the evaluation of damage detection in practical structural health monitoring applications. *Proc. R. Soc. A* 2017, 473, 20160736.
- [11] Farhidzadeh, A., Ebrahimkhanlou, A., Salamone, S., Corrosion damage estimation in multi-wire steel strands using guided ultrasonic waves. In *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, CA, USA, 8–12 March 2015.
- [12] Kharrat, M., Design and Development of a Torsional Guided-Waves Inspection System for the Detection and Sizing of Defects in Pipes. Ph.D. Thesis, Ecole Centrale de Lyon, Écully, France, 2012.
- [13] Ying, Y., A Data-Driven Framework for Ultrasonic Structural Health Monitoring of Pipes, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2012.
- [14] Kirby, R.; Zlatev, Z.; Mudge, P., On the scattering of torsional elastic waves from axisymmetric defects in coated pipes, *J. Sound Vib.* 2012, 331, 3989–4004. [CrossRef]
- [15] Le X., Le Z., „Stress concentration factors due to typical geometric discontinuities for shaft design by numerical simulation”, <https://doi.org/10.18260/1-2--22476>, 2013
- [16] Shan C., Sun J., Jia X., Wu R., Lu X., The mechanical behavior of cylindrical shell with composite corrugations under uniform and concentrated pressure, *Ocean Engineering* 298 (2024),
- [17] Ghavamian A., Mustapha F., Hang B.T., Baharudin T., Yidris N., Detection, Localisation and Assessment of Defects in Pipes Using Guided Wave Techniques: A Review, doi:10.3390/s18124470 *Sensors* 2018, 18, 4470.
- [18] Liu C., Dobson J., Cawley P., Efficient generation of receiver operating characteristics for the evaluation of damage detection in practical structural health monitoring applications. *Proc. R. Soc. A* 2017, 473, 20160736. [CrossRef].
- [19] Farhidzadeh A., Ebrahimkhanlou A., Salamone S., Corrosion damage estimation in multi-wire steel strands using guided ultrasonic waves. In *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, CA, USA, 8–12 March 2015.
- [20] Xiaobin Le P.E., Zelong Le, Stress concentration factors due to typical geometric discontinuities for shaft design by numerical simulation, 2013
- [21] Saparov B, Rakhimov M, Sangirov A, Study of the brittle-elastic matrix and deformations in the struts, Volume. 7, Issue 02, February (2024), <https://doi.org/10.5281/zenodo.10698587>
- [22] Nikraves S., Shen Y.-L., Plasticity-mediated deformation instabilities in thin film-compliant substrate systems: direct three-dimensional simulations, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10853-023-09248-y>
- [23] Xu S., Wang W., Chang Y., Using FEM to predict residual stresses in girth welding joint of layered cylindrical vessels, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 119 (2014) 1e7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2014.02.002>,
- [24] Reddy J. N., „Introduction on the Finite Element Method”, ISBN: 978-1-25-986190-1, 2019.
- [25] Ding Y., Li X., „Crankshaft Strength Analysis of a Diesel Engine Using Finite Element Method”, 10.1109/APPEEC.2011.5748821, 2011.
- [26] Madenci E., Guven I., „The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS”, <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8>, 2015.
- [27] Belachew C. T., Ismail M. C., Karuppanan S., Burst Strength Analysis of Corroded Pipelines by Finite Element Method, *Journal of Applied Sciences*, 2011, ISSN 1812-5654 I DOI: 10.3923/jas.2011.
- [28] Lee D.-M., Kim S.-J., Lee H.-J., Kim Y.-J., Fatigue life evaluation of socket welded pipe with incomplete penetration defect: I-test and FE analysis, *Nuclear Engineering and Technology* 53 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.05.033>
- [29] Patnaik G., Rajput A., Safety assessment of underground steel pipelines with CFRP protection against subsurface blast loading, *Structures* 54 (2023) 1541–1559, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.001>
- [30] Ciocoiu Gh.C., Durbață I., Sporea Nicoleta, Diniță A., Enăchescu Georgiana Luminița, Dumitrescu Anca Mădălina, Experimental research on the state of stress and deformations of cylindrical structures subjected to internal pressure, *Hidraulica*, nr. 4, 2023, p. 7 – 16 (ISSN 1453 – 7303).
- [31] Batalu D., „Analiza cu elemente finite în Inventor Nastran”, Editura Politehnica Press, 2022.
- [32] Butnariu S., Mogan G., „Analiza cu elemente finite în ingineria mecanica. Aplicații practice în ANSYS”, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2014.