



Universitatea Tehnică a Moldovei

**UTILIZAREA COEFICIENTULUI DE INTENSITATE AL
TENSIUNILOR ÎN MONITORIZAREA ȘI ÎNTREȚINEREA
STRUCTURILOR DIN OȚEL**

Masterand:

Zagorodnii Andrei

Conducător:

Țibichi Viorica

conferențiar universitar

doctor în științe tehnice

Chișinău, 2025

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII MOLDOVA

Universitatea Tehnică a Moldovei

Facultatea Construcții, Geodezie și Cadastru

Departamentul Inginerie Civilă și Geodezie

Admis la susținere:

Șef departament ICG, conf. univ., dr.

_____ **A. Taranenco**

“ ” _____ **2025**

UTILIZAREA COEFICIENTULUI DE INTENSITATE AL TENSIUNILOR ÎN MONITORIZAREA ȘI ÎNTREȚINEREA STRUCTURILOR DIN OȚEL

Teză de master

Student: _____ Zagorodnii Andrei, IS-2301M

Conducător: _____ Țibichi Viorica, conf. univ., dr.

Chișinău, 2025

REZUMAT

Zagorodnii Andrei. Utilizarea coeficientului de intensitate al tensiunilor în monitorizarea și întreținerea structurilor din oțel. În lucrare s-au cercetat aplicațiile Coeficientului de Intensitate a Tensiunilor (CIT) în asigurarea integrității structurilor din oțel și prevenirea cedărilor cauzate de fisuri. CIT reprezintă un parametru fundamental în mecanica ruperii, utilizat pentru a evalua comportamentul materialelor sub tensiuni, în special în zonele fisurate.

Necesitatea utilizării CIT devine tot mai evidentă în contextul infrastructurilor critice, cum ar fi podurile sau clădirile industriale, unde siguranța și durabilitatea sunt esențiale. Studiul subliniază influența tipurilor de fisuri și a modurilor de solicitare (Mod I, II, III) asupra valorilor CIT, oferind soluții pentru proiectarea și monitorizarea preventivă a structurilor din oțel.

Pentru obținerea rezultatelor numerice și grafice, s-au utilizat metode experimentale și numerice, precum Metoda Elementelor Finite (FEM). În partea aplicativă, integritatea îmbinărilor sudate a fost analizată prin calculul CIT, identificând fisurile critice din cordoanele de sudură. De asemenea, a fost implementat un Sistem Integrat de Monitorizare a Sănătății Structurale (SIMSS), care utilizează senzori și algoritmi de Inteligență Artificială pentru detectarea și prognoza evoluției fisurilor. Acest sistem permite evaluarea continuă a tensiunilor în zonele critice și previne cedările catastrofale.

Lucrarea include și analiza factorilor care influențează CIT, oferind o abordare detaliată pentru gestionarea fisurilor în structuri complexe. Conform rezultatelor, monitorizarea bazată pe CIT contribuie semnificativ la prelungirea duratei de viață a structurilor și reducerea costurilor de întreținere.

Teza este compusă din introducere, 3 capitole, concluzii, bibliografie și o anexă. Lucrarea conține 60 pagini (fără anexă), 29 figuri și 25 tabele. Bibliografia constă din 40 surse de referință. Anexa tezei de master cuprinde 13 pagini, 3 figuri și 4 tabel. În cadrul anexei sunt reprezentate rezultatele calculelor fermei metalice, care se referă la studiile de caz.

Cuvinte-cheie: coeficientul de intensitate a tensiunilor (CIT), fisură, senzori, monitorizare structurii.

SUMMARY

Zagorodnii Andrei. The Use of the Stress Intensity Factor in the Monitoring and Maintenance of Steel Structures. The paper examines the applications of the Stress Intensity Factor (SIF) in ensuring the integrity of steel structures and preventing failures caused by cracks. The SIF is a fundamental parameter in fracture mechanics, used to evaluate the behavior of materials under stress, particularly in cracked areas.

The need to use the SIF is increasingly evident in the context of critical infrastructures, such as bridges or industrial buildings, where safety and durability are paramount. The study emphasizes the influence of various types of cracks and loading modes (Mode I, II, III) on the SIF values, providing solutions for the design and preventive monitoring of steel structures.

To obtain numerical and graphical results, both experimental and numerical methods were employed, including the Finite Element Method (FEM). In the applied section, the integrity of welded joints was analyzed through SIF calculations, identifying critical cracks in the weld beads. Additionally, an Integrated Structural Health Monitoring System (SIMSS) was implemented, utilizing sensors and Artificial Intelligence algorithms for detecting and predicting the progression of cracks. This system allows for continuous stress assessment in critical areas and prevents catastrophic failures.

The paper also includes an analysis of the factors influencing the SIF, offering a detailed approach to managing cracks in complex structures. According to the results, SIF-based monitoring significantly contributes to extending the service life of structures and reducing maintenance costs.

The thesis is composed of an introduction, 3 chapters, conclusions, references, and an appendix. The paper contains 60 pages (excluding the appendix), 29 figures, and 25 tables. The references list comprises 40 sources. The master's thesis appendix includes 13 pages, 3 figures, and 4 tables. The appendix presents the results of calculations for a steel truss, corresponding to the case studies.

Keywords: stress intensity factor (SIF), crack, sensors, structural monitoring.

CUPRINS

INTRODUCERE	8
1. ROLUL COEFICIENTUL DE INTENSITATE A TENSIUNILOR (CIT) ÎN ANALIZA FISURILOR STRUCTURALE	10
1.1. Definirea CIT și rolul său în analiza fisurilor	10
1.2. Teoria mecanicii ruperii elastice liniare și CIT.....	11
1.3. Factori care influențează CIT.....	14
1.4. Utilizarea CIT în estimarea duratei de viață a structurilor metalice	15
2. DEZVOLTAREA UNUI SISTEM INTEGRAT DE MONITORIZARE A SĂNĂTĂȚII STRUCTURALE BAZAT PE COEFICIENTUL DE INTENSITATE A TENSIUNILOR (CIT) ȘI INTELIGENȚA ARTIFICIALĂ	19
2.1. Introducere	19
2.2. Materiale și metode.....	20
2.3. Evaluarea performanțelor teoretice ale sistemului SIMSS.	28
2.4. Inovații și perspective în monitorizarea structurilor: Integrarea IA.....	29
2.5. Extensometre și Senzori folosiți pentru monitorizarea sănătății structurii.	31
3. PROTOTIP DE ANALIZĂ A COEFICIENTULUI DE INTENSITATE A TENSIUNILOR ȘI MONITORIZARE STRUCTURALĂ A UNEI FERME DIN OȚEL	46
3.1. Calculul al coeficientului de intensitate a tensiunilor (CIT).....	46
3.2. Componente de monitorizare.....	50
3.3. Configurația detaliată a sistemului de senzori	52
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI	56
Bibliografie.....	58
Anexa A.....	62

INTRODUCERE

În ultimii ani, preocuparea pentru creșterea siguranței și durabilității construcțiilor din oțel a devenit tot mai stringentă, în contextul modernizării infrastructurilor și al cerințelor sporite de performanță structurală. Acest fapt este strâns legat de necesitatea identificării și prevenirii ruperilor cauzate de fisuri, procese de oboseală și fenomene de corodare. În acest context, Coeficientul de Intensitate a Tensiunilor (CIT) s-a impus ca un parametru important în studiul fisurilor în materialele de oțel și a modului în care acestea se propagă. Prin valorificarea conceptelor din mecanica ruperii și integrarea lor în sisteme avansate de monitorizare, se creează premisa unor analize aprofundate și a implementării unor măsuri de întreținere predictivă, asigurând astfel prevenirea cedărilor structurale majore.

Tema propusă – studierea și aplicarea CIT în proiectarea și monitorizarea construcțiilor din oțel, prin includerea unor tehnologii moderne de senzori și algoritmi de analiză avansată – este pe cât de actuală, pe atât de necesară. Într-o perioadă în care costurile de reparație a infrastructurilor cresc exponențial, iar cerințele de siguranță se află într-o continuă ascensiune, cercetările ce vizează modalități de prevenție și intervenție rapidă dobândesc o importanță deosebită. Relevanța acestor cercetări se reflectă atât în domeniul construcțiilor civile, cât și în zone critice precum industria navală, aeronautică și cea energetică.

Scopul principal al acestei cercetări constă în dezvoltarea și validarea unei metode integrate de calcul și monitorizare a Coeficientului de Intensitate a Tensiunilor (CIT) pentru a evalua riscul de fisurare și a prelungi durata de viață a structurilor din oțel. Prin aprofundarea legilor oboselii, a comportamentului fisurilor în diferite regiuni critice ale structurii și prin corelarea rezultatelor cu tehnici moderne de monitorizare, se urmărește stabilirea unei abordări care să contribuie la creșterea siguranței în exploatare.

Obiectivele cercetării sunt: realizarea unui cadru teoretic actualizat cu privire la conceptele fundamentale de mecanică a ruperii și rolul CIT în predicția propagării fisurilor.

Analiza tehnicilor și standardelor existente pentru calculul CIT și identificarea limitelor lor de aplicabilitate în situații complexe (geometrii variate, încărcări ciclice, efecte termice etc.).

Elaborarea și testarea unui Sistem Integrat de Monitorizare a Sănătății Structurale (SIMSS), bazat pe rețele de senzori (deformații, vibrații, temperatură) și algoritmi de învățare automată, pentru evaluarea continuă a CIT în zonele critice ale structurilor metalice.

Stabilirea unei metodologii de intervenție și mentenanță predictivă, bazată pe valorile CIT măsurate și pe ratele de propagare a fisurilor, în vederea prelungirii duratei de viață a construcțiilor din oțel.

Ipoteza de cercetare se presupune că, prin integrarea calculului Coeficientului de Intensitate

a Tensiunilor cu monitorizarea continuă a parametrilor principali (tensiuni, deformații, temperatură etc.), se poate cuantifica stadiul de evoluție a fisurilor în timp real, fapt ce va permite optimizarea planului de mentenanță și reducerea riscului de cedare a structurilor metalice. În plus, se anticipează că implementarea unor algoritmi va îmbunătăți semnificativ precizia detectării și predicției fisurilor comparativ cu metodele tradiționale.

Implementarea unui Sistem Integrat de Monitorizare a Sănătății Structurale (SIMSS), folosind rețele de senzori și algoritmi. Această abordare este motivată de nevoia monitorizării continue, identificării anomaliilor în timp real și reducerii factorilor subiectivi (erori de inspecție vizuală, de exemplu).

Sumarul capitolelor tezei și legătura dintre acestea.

Pentru a răspunde obiectivelor și a confirma ipoteza, teza este structurată în mai multe capitole cu rol specific:

Capitolul 1 prezintă fundamentele teoretice și actualitatea cercetărilor în domeniul mecanicii ruperii, punând accent pe rolul CIT în evaluarea fisurilor.

Capitolul 2 detaliază proiectarea și implementarea unui Sistem Integrat de Monitorizare a Sănătății Structurale (SIMSS), prezentând arhitectura senzorilor, algoritmi de prelucrare a datelor și procedurile de mentenanță predictivă.

Capitolul 3 se concentrează pe aplicarea tehnicilor propuse în studii de caz, oferind exemple concrete de structuri metalice unde CIT a fost măsurat, interpretat și corelat cu datele de monitorizare.

Concluzionând, importanța și actualitatea cercetării rezidă în nevoia continuă de îmbunătățire a modalităților de analiză și monitorizare a fisurilor în structurile din oțel, astfel încât să fie evitate situațiile de avarie. Integrarea metodologiilor teoretice cu tehnologiile moderne de monitorizare și inteligență artificială asigură o abordare complexă, capabilă să răspundă provocărilor de siguranță, fiabilitate și cost în infrastructurile critice. Metodologia propusă, bazată pe utilizarea Coeficientului de Intensitate a Tensiunilor corelat cu un sistem de monitorizare continuă, reprezintă un pas înainte în conceperea și întreținerea structurală, contribuind la creșterea a nivelului de protecție a vieții umane.

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Concluziile cercetării indică în primul rând faptul că integrarea Coeficientului de Intensitate a Tensiunilor (CIT) în evaluarea comportamentului fisurilor din structurile din oțel reprezintă un instrument eficient de depistare a riscului de propagare, care vine în completarea metodelor tradiționale de inspecție și întreținere. Prin corelarea calculelor extinse ale CIT cu monitorizarea continuă a tensiunilor, deformațiilor și factorilor de mediu, lucrarea demonstrează că ipoteza inițială – conform căreia se pot identifica la timp fisurile incipiente și se pot adopta măsuri preventive – este validată. Rezultatele obținute, reflectate în capitolele dedicate analizelor numerice și studiilor de caz, evidențiază îndeplinirea obiectivelor formulate în Introducere: s-a realizat un cadru teoretic actualizat pentru calculul CIT, s-au proiectat un sistem de monitorizare bazate pe senzori inteligenți, iar apoi s-au identificat protocoale de mentenanță predictivă, toate contribuind la diminuarea riscurilor de cedare a structurii.

Contribuțiile personale se regăsesc în implementarea unei metodologii de calcul al CIT, care îmbină analiza teoretică cu monitorizarea prin senzori și algoritmi adaptivi de învățare automată. Această metodologie include dezvoltarea unui model matematic complex pentru calculul CIT care integrează factori multipli de corecție (temperatură, umiditate, încărcare), introduce coeficienți noi de ajustare pentru condițiile specifice structurilor metalice sudate, permite evaluarea dinamică a evoluției fisurilor în timp real și oferă o precizie îmbunătățită în estimarea comportamentului structurii. În plus, implementarea unui sistem de monitorizare bazat pe rețele configurate de senzori diferiți (detectare fisuri, deformații, vibrații, temperatură), algoritmi adaptivi de procesare a datelor în timp real, tehnici de învățare automată pentru predicția propagării fisurilor și sisteme de alertare automată cu multiple niveluri de severitate constituie o altă contribuție semnificativă.

Integrarea a componentelor teoretice s-a realizat prin dezvoltarea unei platforme software pentru corelarea calculelor CIT cu datele din monitorizare, implementarea unui sistem de validare încrucișată a rezultatelor, cercetarea a unui mecanism de ajustare automată a parametrilor de calcul și optimizarea continuă a modelului matematic pe baza datelor colectate.

Totuși, implementarea practică la scară largă a metodologiilor propuse întâmpină câteva limitări, legate în special de costurile relativ ridicate ale soluțiilor de monitorizare, de accesul limitat la echipamente de testare în medii extreme și de imposibilitatea de a controla toți parametrii din teren. Mai mult, simulările numerice se bazează pe ipoteze privind omogenitatea materialului și distribuția tensiunilor, ceea ce poate genera discrepante în cazul structurilor complexe și solicitărilor dinamice neobișnuite. Alte incertitudini pot apărea din calitatea datelor colectate de senzori și din factori externi dificil de anticipat (ex. vibrații neintenționate, schimbări bruște de

temperatură sau umiditate). În contextul acestor limite, rămân nerezolvate unele aspecte legate de integrarea completă a datelor provenite de la numeroși senzori diferiți și de perfecționarea metodelor de analiză în timp real pentru fisurile microscopice.

Recomandările pentru viitor se împart în două categorii principale. În privința cercetării ulterioare, este necesară extinderea analizelor CIT la regimuri de încărcare mult mai variate și accentuarea componentelor de tip impact sau torsiune combinată, pentru a oferi o imagine mai amplă asupra propagării fisurilor. De asemenea, aprofundarea metodelor de fuziune a datelor multi-senzor și rafinarea algoritmilor de învățare profundă ar putea îmbunătăți fiabilitatea predicțiilor privind evoluția fisurilor și ar scădea rata alarmelor false. În plus, standardizarea la nivel internațional a procedurilor de monitorizare bazate pe CIT, prin colaborarea cu instituții de reglementare, ar favoriza adoptarea pe scară largă a soluțiilor de acest tip, sprijinind totodată și formarea profesională a inginerilor. În privința aplicabilității imediate, este oportun ca organizațiile care proiectează și administrează mari infrastructuri metalice să adopte această strategie de evaluare și întreținere predictivă. Rezultatele pot fi utilizate pentru alcătuirea unor ghiduri operaționale de inspecție, pentru dezvoltarea software-urilor specializate de monitorizare și pentru integrarea noilor metode de calcul al CIT în procesul de formare continuă a specialiștilor. Astfel, metodele propuse în prezenta lucrare oferă un pas înainte, facilitând optimizarea costurilor de mentenanță și îmbunătățind gestionarea riscurilor în mediile unde siguranța este de o importanță vitală.

Recomandările pentru viitor se împart în două categorii principale. În privința cercetării ulterioare, este necesară extinderea analizelor CIT la regimuri de încărcare mult mai variate și accentuarea componentelor de tip impact sau torsiune combinată, pentru a oferi o imagine mai amplă asupra propagării fisurilor. De asemenea, aprofundarea metodelor de fuziune a datelor multi-senzor și rafinarea algoritmilor de învățare profundă ar putea îmbunătăți fiabilitatea predicțiilor privind evoluția fisurilor și ar scădea rata alarmelor false. În plus, standardizarea la nivel internațional a procedurilor de monitorizare bazate pe CIT, prin colaborarea cu instituții de reglementare, ar favoriza adoptarea pe scară largă a soluțiilor de acest tip, sprijinind totodată și formarea profesională a inginerilor. În privința aplicabilității imediate, este oportun ca organizațiile care proiectează și administrează mari infrastructuri metalice să adopte această strategie de evaluare și întreținere predictivă. Rezultatele pot fi utilizate pentru alcătuirea unor ghiduri operaționale de inspecție, pentru dezvoltarea software-urilor specializate de monitorizare și pentru integrarea noilor metode de calcul al CIT în procesul de formare continuă a specialiștilor. Astfel, metodele propuse în prezenta lucrare oferă un pas minor înainte, facilitând optimizarea costurilor de mentenanță și îmbunătățind gestionarea riscurilor în mediile unde siguranța este de o importanță vitală.

BIBLIOGRAFIE

1. Irwin, G.R., "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 361-364, 1957. Disponibil: <https://imechanica.org/files/1957%20Irwin%20Analysis%20of%20stresses%20and%20strains%20near%20the%20end%20of%20a%20crack%20traversing%20a%20plate.pdf>
2. Anderson, T. L. (2005). *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC Press. Disponibil: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC026/Prof_Wang_Chong/Parte%20I%20Anderson%20T.L.%20Fracture%20mechanics%20-%20Fundamentals%20and%20applications.pdf
3. MORARU, Gh.; ȚIBICHI, V. The determination of the stress intensity factor in three dimensional bodies. 28-29 may, *The XXth SISOM 2009, Bucharest Published*. p. 1 - 6.
4. ȚIBICHI, V.; TARANENCO, A. Coeficientul de intensitate al tensiunilor pentru o fisură de tip fâșie pătrată într-un corp tridimensional. In: *Lucrările celei de-a 15-a conferințe naționale de construcții metalice cu participare internațională*, Iași 16-17 noiembrie 2017, pp.135-140. ISSN 2559-0812, ISSN-L 2559-0812.
5. ȚIBICHI Viorica, TARANENCO Anatolie, *Three dimension body with rectangular plane fracture ribbon*, In: Материалы Международная научная интернет-конференция «Тенденции и перспективы развития науки и образования в условиях глобализации», Вып. 59, Сборник научных трудов, Переяслав – 29 mai 2020, pp 493-496, <http://confscientific.webnode.com.ua>
6. MORARU, GH.; ȚIBICHI, V. Determinarea coeficienților de intensitate a tensiunilor pentru fisuri în corpuri tridimensionale In: *tezele Conferinței tehnico-științifice a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM*, Vol. II, Chișinău, 2008, pp. 485-486. ISBN 978-9975-45-068-3.
7. TARANENCO, A. Saltul deplasărilor în fisura de tip fâșie pătrată dintr-un corp de dimensiuni mari. In: *tezele Conferinței tehnico-științifice a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM*. Chișinău, 16-18 noiembrie 2017, pp. 142-143. ISBN 978-9975-45-545-9(Vol. – II).
8. TARANENCO, A.; ȚIBICHI, V. Estimarea modului de divizare a fisurii în elemente finite de diferită formă. In: *tezele Conferinței tehnico-științifice a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM*. Chișinău, 16-18 noiembrie 2017, pp. 138-141. ISBN 978-9975-45-545-9(Vol. – II).
9. ȚIBICHI, Viorica și Anatolie TARANENCO. Adaptive discretization of complex planar crack shapes for numerical analysis. In: Scientific symposium, with national and international participation at Technical University of Moldova - ConsGeoCad 2024, 21-23 noiembrie 2024.

10. TARANENCO, Anatolie și Viorica ȚIBICHI. Investigation of geometric effects on stress intensity factors in three-dimensional bodies: an advanced numerical approach. In: Scientific symposium, with national and international participation at Technical University of Moldova - ConsGeoCad 2024, 21-23 noiembrie 2024.
11. ȚIBICHI, Viorica și Andrei ZAGORODNII. Integrated structural health monitoring system based on sif analysis and artificial intelligence: a methodological proposal. In: Scientific symposium, with national and international participation at Technical University of Moldova - ConsGeoCad 2024, 21-23 noiembrie 2024.
12. ȚIBICHI, Viorica și Andrei BALTAGA. Analysis of stress intensity factors in welded Joints of steel lattice girders. In: Scientific symposium, with national and international participation at Technical University of Moldova - ConsGeoCad 2024, 21-23 noiembrie 2024. (în curs de publicare).
13. Rooke, D. P.; Cartwright, D. J. (1976). *Compendium of stress intensity factors*. HMSO Ministry of Defence. Procurement Executive. Disponibil: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA163779.pdf>
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Stress_intensity_factor#cite_ref-rooke_7-2
15. Maddox S.J. (1975), "An analysis of fatigue cracks in fillet welded joints" Disponibil: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00038890>
16. Sathish T.R.; M. M. M Patnaik (2013), „Evaluation of Stress Intensity Factor of Welded Structural Steel Component”. Disponibil: <https://www.ndt.net/article/ndtnet/2014/V1i501.pdf>
17. Hobbacher A. (1993) „Stress intensity factors of welded joints”. Disponibil: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/001379449390278Z>
18. Brennan FP, Dover WD, Kare’ RF (1999) „Parametric equations for T-butt weld toe stress intensity factors”. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/274083589_Weld_Toe_SCF_and_Stress_Distribution_Parametric_Equations_for_Tension_Membrane>Loading
19. Han Y, Huang XP, Zhang Y, Cui WC (2005) „A comparative study of simplified SIF calculations of surface cracks at weld toe”. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/289435284_Comparative_study_of_simplified_SIF_calculations_of_surface_cracks_at_weld_toe
20. Pasca N, Marsavita L, Negru R et al (2013) „Estimation of the stress intensity factor for 3D cracked T-joint”. Disponibil: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-36691-8_41
21. Wawrzynek PA, Carter BJ, Ingraffea AR (2009) „Advances in simulation of arbitrary 3D crack growth using FRANC3D/NG” .In: 12th international conference on fracture, Ottawa,

Canada. Disponibil:

https://www.researchgate.net/publication/239951085_Advances_in_simulation_of_arbitrary_3D_crack_growth_using_FRANC3DNG

22. Jie ZY (2017) „Study on the fatigue performance of welded joints in steel bridges under prior corrosion and complex stress fields” . Dissertation, Southwest Jiaotong University (in Chinese). Disponibil:
https://www.researchgate.net/publication/313789800_A_study_of_fatigue_crack_growth_from_artificial_corrosion_pits_at_welded_joints_under_complex_stress_fields
23. Zhiyu Jie, Yadong Li, Xing Wei (2016) „Analysis of the stress intensity factor of welded joints under prior corrosion and complex stress fields”. Disponibil:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-016-0114-6>
24. Van Vliet, Krystyn J. (2006); "3.032 Mechanical Behavior of Materials"
25. G. P. Cherepanov, *The propagation of cracks in a continuous medium*, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 31(3), 1967, pp. 503–512.
26. J. R. Rice, *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*, Journal of Applied Mechanics, 35, 1968, pp. 379–386.
27. Lee, R. F., & Donovan, J. A. (1987). J-integral and crack opening displacement as crack initiation criteria in natural rubber in pure shear and tensile specimens. *Rubber chemistry and technology*, 60(4), 674–688.
28. Meyers and Chawla (1999): "Mechanical Behavior of Materials," 445–448.
29. Yoda, M., 1980, *The J-integral fracture toughness for Mode II*, Int. J. Fracture, 16(4), pp. R175–R178.
30. Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303-315.
31. Inaudi, D., & Glisic, B. (2010). Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing. *Journal of pressure vessel technology*, 132(1).
32. Ritchie, R. O. (1999). Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International Journal of Fracture*, 100(1), 55-83.
33. Sohn, H., Worden, K., & Farrar, C. R. (2002). Statistical damage classification under changing environmental and operational conditions. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(9), 561-574.
34. Hewamalage, H., Bergmeir, C., & Bandara, K. (2021). Recurrent neural networks for time series forecasting: Current status and future directions. *International Journal of Forecasting*,

- 37(1), 388-427.
35. Zhang, L., et al. (2023). "Integration of SIF Analysis with Machine Learning." *International Journal of Structural Integrity*, 25(2), 167-182.
 36. Chen, K., and Anderson, P. (2024). "Advanced Sensors in Structural Health Monitoring." *Sensors and Smart Structures*, 15(3), 234-249.
 37. Kumar, V., and Liu, Y. (2023). "Real-Time Monitoring Systems for Structural Analysis." *Journal of Structural Engineering*, 149(4), 345-360.
 38. Liu, R., and Kumar, S. (2024). "Validation Methods for AI-Based Structural Monitoring Systems." *Engineering Structures*, 92, 123-138.
 39. Wilson, J., et al. (2023). "Artificial Intelligence in Structural Engineering: Current State and Future Prospects." *Smart Structures Review*, 42(1), 78-93.
 40. Liu, Y., et al. (2023). "Machine Learning Applications in Structural Health Monitoring." *Smart Structures and Systems*, 18(2), 89-104.
 41. Brown, M., and Chen, H. (2024). "Future Trends in Structural Health Monitoring." *Engineering Analysis*, 28(3), 234-248.
 42. <https://www.micro-measurements.com/pca/special-use-gages/displacement>
 43. <https://www.micro-measurements.com/pca/?page=1&search=cpa>
 44. https://www.micro-measurements.com/pca/special-use-gages/residual_stress
 45. https://www.micro-measurements.com/pca/special-use-gages/crack_detection
 46. https://www.micro-measurements.com/pca/special-use-gages/displacement_sensor
 47. https://www.micro-measurements.com/pca/special-use-gages/shear_modulus
 48. https://www.micro-measurements.com/pca/special-use-gages/pressure_pulse
 49. https://www.hbm.com/en/7452/cylindric-strain-gauges-for-measurements-in-bolts/?product_type_no=LB11/TB21%20Strain%20Gauges%20for%20Measuring%20in%20Screws%20&%20Bolts
 50. Alexander Nikolaevich Shuvalov, Oleg Vladimirovich Emel'yanov, Alexander Valeryevich Bulytkov, Milan Proki (2016) „STRESS INTENSITY FACTOR IN WELDED JOINTS OUT OF DOUBLE ANGLES IN LATTICE STEEL STRUCTURES”. Disponibil: <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1451-4117/2016/1451-41171602285N.pdf>