

XIX KRAJOWA  
KONFERENCJA  
MECHANIKI  
PEKANIA

ABSTRAKTY



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ



XIX  
KRAJOWA KONFERENCJA  
MECHANIKI PEKANIA

ABSTRAKTY



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej  
Wrocław 2023

### Recenzenci

Ricardo BRANCO  
Grzegorz LESIUK  
Wojciech MACEK  
Michał SMOLNICKI

### Redakcja

Grzegorz LESIUK  
Wojciech MYSZKA

### Opracowanie techniczne i korekta

Stanisław GANCARZ

### Ilustracja na okładce

Materiały konferencyjne

Złożono na podstawie dostarczonych materiałów

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsza książka, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2023

OFICYNĄ WYDAWNICZĄ POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>  
e-mail: [oficwyd@pwr.edu.pl](mailto:oficwyd@pwr.edu.pl)

ISBN 978-83-7493-255-4  
[https://doi.org/10.37190/XIX\\_KKMP\\_2023](https://doi.org/10.37190/XIX_KKMP_2023)

---

## SPIS TREŚCI

João ARROJADO, Anis MOHABEDDINE, José A.F.O. CORREIA, Diogo RIBEIRO, Anna RACOKZY, Fatigue Performance of Puddle Iron Retrofitting Solutions: A Parametric Study .....	7
Grzegorz ŚWIT, Anna ADAMCZAK-BUGNO, Aleksandra KRAMPIKOWSKA, Ihor DZIOBA, Sebastian LIPIEC, Eksperymentalno-numeryczna analiza procesu destrukcji rurociągów gazowych. Część 2 – Analiza sygnałów emisji akustycznej .....	8
Michał BÖHM, Krzysztof KLUGER, Tomasz OSIECKI, Frank SCHUBERT, Denis BENASCIUTTI, Fatigue Behavior of 3D Printed Ti-6Al-4V Specimens with Spheric Stress Concentrator Void .....	10
Z. MARCINIAK, R. BRANCO, W. MACEK, G. LESIUK, C. MALÇA, Fatigue behaviour of L-PBF 18Ni300 steel under variable-amplitude loading .....	12
R. BRANCO, J.D. COSTA, W. MACEK, S.-P. ZHU, G. LESIUK, F. BERTO, Comparison of different averaging methods and damage laws in multiaxial fatigue life assessment of notched components .....	13
Michał STOSIAK, Mykola KARPENKO, Paweł BURY, Paulius SKAČKAUSKAS, Hydrodynamiczne skutki uszkodzeń hydraulicznych przewodów elastycznych pod wpływem obciążeń dynamicznych. Modelowanie i eksperyment .....	14
Karol CZEKAJ, Adam NIEŚŁONY, Robert OWSIŃSKI, Artur DZIURA, Influence of collisions of suspension system subcomponents on design fatigue life .....	16
Szymon DUDA, Grzegorz LESIUK, Michał SMOLNICKI, Paweł STABLA, Paweł ZIELONKA, Joanna WARYCHA, Grzegorz ZIÓŁKOWSKI, Fatigue Behavior of CFRP Thin-Walled Tubes: An Experimental Study with Damage Analysis Based on the Acoustic Signals .....	18
Szymon DZIUBA, Grzegorz LESIUK, Wpływ medium retardacyjnego na przebieg procesu propagacji pęknięcia metalowych elementów wytwarzanych metodami przyrostowymi .....	20
Vítor M.G. GOMES, José A.F.O. CORREIA, Grzegorz LESIUK, Abílio M.P. de JESUS, Application of the Theory of Critical Distances for Notch Effect Analysis in Spring Steel .....	21
A. GRBOVIC, A. SOLOB, A. SEDMAK, Optimization of Wing-Fuselage Connecting Lug Geometry in Respect to Its Fatigue Life .....	22
Mario GUAGLIANO, Influence of Mechanical and Hybrid Post Processing on the Fatigue Behavior of an Additively Manufactured Aluminium Alloy .....	23
Vítor M.G. GOMES, José A.F.O. CORREIA, Grzegorz LESIUK, Abílio M.P. de JESUS, A Methodology for the Fatigue Characterization of Parabolic Leaf Springs in Freight Wagons .....	24
Mohammad S. AL KHAZALI, Stanislav SEITL, Pavel POKORNÝ, Grzegorz LESIUK, Szymon DZIUBA, Comparison of Fatigue Crack Propagation Rates in High Strength Steel S460 S690 & S960 Under Stress Ratio $R = 0.1$ .....	26
Robert KOSTUREK, Lucjan ŚNIEŻEK, Janusz TORZEWSKI, Rafał LEWCZUK, Tomasz ŚLĘZAK, Wpływ obróbki wybuchowej na niskocyklową wytrzymałość zmęczeniową połączeń FSW stopu AA7075-T651 .....	27
Maciej KOTYK, Przemysław STRZELECKI, Wyznaczanie obszaru braku działania karbu na trwałość zmęczeniową stopu AA2519 T62 .....	29
Julita KRASSOWSKA, Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Concrete with Basalt Fibers or Minibars .....	31

---

---

Tomasz SOCHA, Arkadiusz DENISIEWICZ, Krzysztof KULA, Grzegorz LESIUK, Wojciech BŁAŻEJEWSKI, Szymon DUDA, Paweł ZIELONKA, Anna WYBRANIEC, Bruno PEDROSA, Cristiane C. LOPES, Numeryczna i eksperymentalna analiza połączenia betonu i pręta kompozytowego w teście pull-out .....	33
Patrycja LAU, Piotr PACZOS, Analiza wytrzymałości zmęczeniowej osi kolejowej .....	35
Grzegorz LESIUK, Kayode OLALEYE, Konrad GRUBER, Patrycja SZYMCZYK-ZIÓŁKOWSKA, Nuno Miguel FERREIRA, Szymon DZIUBA, Felipe Klein FIORENTIN, Dariusz ROZUMEK, Marco PARENTE, Abilio M.P. De JESUS, Comparative Study of FCGR in Additively Manufactured Materials – IN625 and IN718 .....	37
Sebastian LIPIEC, Ihor DZIOBA, Grzegorz ŚWIT, Anna ADAMCZAK-BUGNO, Aleksandra KRAMPIKOWSKA, Eksperymentalno-numeryczna analiza procesu destrukcji rurociągów gazowych. Część 1. Analiza pól naprężeń i odkształceń .....	38
Paweł ŻOCHOWSKI, Marcin BAJKOWSKI, Roman GRYGORUK, Mariusz MAGIER, Dariusz PYKA, Mirosław BOCIAN, Krzysztof JAMROZIAK, Numerical Analyses of Additively Manufactured Weapon Components Subjected to High Velocity Impact Loads .....	40
Bartosz MAZUREK, Adam NIESŁONY, Influence of Power Spectral Density Averaging on Fatigue Life Calculation .....	42
Krzysztof JUNIK, Daniel MEDYŃSKI, Wojciech MACEK, Kayode OLALEYE, Szymon DUDA, Grzegorz LESIUK, Krzysztof JAMROZIAK, Fatigue and Fracture Properties of Rigid PUR Elastomers .....	44
António M. MOURÃO, José A.F.O. CORREIA, Cláudio HORAS, Túlio BITTENCOURT, Rui CALÇADA, Stochastic Fatigue Strength Modelling of a Double-Shear Riveted Connection .....	45
Kayode OLALEYE, Dariusz PYKA, Mirosław BOCIAN, Adam KURZAWA, Krzysztof JAMROZIAK, Ballistic and Fracture Performance of Solid DCPD with Varying Thicknesses Subjected to an Impact Load .....	46
Grzegorz ŚWIT, Ihor DZIOBA, Robert PAŁA, Anna ADAMCZAK-BUGNO, Aleksandra KRAMPIKOWSKA, Wpływ ukierunkowania wtrąceń na odporności na pękanie oraz rozkłady naprężeń przed frontem pęknięcia w zmiennych temperaturach testu .....	48
Robert PANOWICZ, Marcin KONARZEWSKI, Adam JESCHKE, Constitutive Damage Modelling of a 3D PC and ABS Blend .....	50
Ana PAVLOVIC, Hybrid Simulation of Dynamic Loading on Floating Laminates: Combining FEM and SPH Methods .....	52
Bruno PEDROSA, Fatigue Modelling of Low-Carbon Steel Bolt Hole: From Material to Structural Detail .....	53
Carlos REBELO, Bruno PEDROSA, José CORREIA, Grzegorz LESIUK, Probabilistic Modeling of Fatigue in a Structural Component Using a Multiscale Material-Detail Approach .....	55
Dariusz ROZUMEK, Grzegorz LESIUK, Aleksandra KRÓLICKA, Roman KUZIĄK, Krzysztof RADWAŃSKI, Badania eksperymentalne wzrostu pęknięć zmęczeniowych stali bainitycznej .....	57
Daniela SCHOB, Lukas RICHTER, Philipp MAASCH, Robert ROSZAK, Grzegorz ZIÓŁKOWSKI, Michał OLEJARCZYK, Piotr GRUBER, Emilia GROCHOWSKA, Tomasz KURZYŃSKI, Matthias ZIEGENHORN, Abaqus Umat Implementation for Evaluating Shear Behavior in Selectively Laser-Sintered Polyamide 12: An Experimental and Numerical Approach .....	59

---

---

Aleksandar SEDMAK, Tamara SMOLJANIĆ, Simon SEDMAK, Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in TiAl6V4 Hip Implants under Different Exploitation Conditions .....	61
Stanislav SEITL, Pavel POKORNÝ, Vít KŘIVÝ, Jan KLUSÁK, Experimental Investigation on Fatigue Behaviour of S460 Plate with Cruciform Joints .....	62
João Nuno SILVA, António M. MOURÃO, Cláudio HORAS, José A.F.O. CORREIA, Abílio De JESUS, A Comparative Study on Probabilistic Modelling of Fatigue Strength Curves and Their Use in Fatigue Damage Evaluations of Riveted Connections .....	64
Sebastian SŁAWSKI, Teresa FRAS, Sławomir DUDA, Wpływ ułożenia warstw wzmacniających na absorpcję energii uderzenia pocisku parabellum w wielowarstwowy materiał kompozytowy .....	65
Marta SŁOWIK, Amanda AKRAM, Wpływ uziarnienia i wytrzymałości kruszywa na parametry pęknięcia betonu .....	67
Michał SMOLNICKI, Grzegorz LESIUK, Paweł ZIELONKA, Paweł STABLA, Szymon DUDA, Przygotowanie modelu uczenia maszynowego bazując na emisji akustycznej do identyfikacji przyczyn degradacji kompozytów .....	69
Tomasz SOCHA, Arkadiusz DENISIEWICZ, Krzysztof KULA, Grzegorz LESIUK, Wojciech BŁAŻEJEWSKI, Wzmacnianie uszkodzonych belek z drewna i materiałów drewnopochodnych taśmami CFRP .....	71
Maksymilian STĘPCZAK, Dariusz PYKA, Adam KURZAWA, Mirosław BOCIAN, Krzysztof JAMROZIAK, Modeling of Crack Propagation in UHMWPE Material Subjected to Impact Load .....	73
Piotr SWACHA, Adam LIPSKI, Michał PIOTROWSKI, Badania programowane stali S355J2+N w zakresie wysoko- i gigacyklowym .....	74
Agnieszka SZUST, Anna WYBRANIEC, Kamil CIĘŻKI, Analiza porównawcza wytrzymałości taśm wspinaczkowych – wykonanych z PA I UHMWPE .....	76
Janusz TORZEWSKI, Janusz KLUCZYŃSKI, Krzysztof GRZELAK, Marcin WACHOWSKI, Comparison of the Fatigue Behaviour of Wrought and Additively Manufactured 316L Austenitic Steel .....	78
Andrzej S. WOJTAS, X-Ray Diffraction in Research and in Production Quality Control .....	81
Agnieszka SZUST, Joanna WIŚNIEWSKA, Andrzej ŻAK, Anna WYBRANIEC, Analiza mechanizmów uszkodzeń karabinków w aspekcie monitorowania procesu produkcji .....	82
Shun-Peng ZHU, Probabilistic Fatigue Assessment under Notch and Size Effects .....	84
Paweł ZIELONKA, Grzegorz LESIUK, Szymon DUDA, Michał SMOLNICKI, Paweł STABLA, Joanna WARYCHA, Fatigue Behavior of Composite Rebars for Concrete Reinforcement Based on Experimental Studies .....	85
Grzegorz ZIÓŁKOWSKI, Iryna SMOLINA, Emilia GROCHOWSKA, Andrzej PAWLAK, Karol KOBIELA, Konrad GRUBER, Matthias ZIEGENHORN, Robert ROSZAK, Daniela SCHOB, Lukas RICHTER, Philipp MAASCH, Tomasz KURZYNOWSKI, Understanding the Relationship between Pore Features and Fatigue Behaviour in AlSi7Mg0.6 Alloy Fabricated by Additive Manufacturing .....	86

---





---

# FATIGUE PERFORMANCE OF PUDDLE IRON RETROFITTING SOLUTIONS: A PARAMETRIC STUDY

João ARROJADO<sup>1\*</sup>, Anis MOHABEDDINE<sup>2</sup>, José A.F.O. CORREIA<sup>1</sup>,  
Diogo RIBEIRO<sup>3</sup>, Anna RACOKZY<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CONSTRUCT, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto

\* Corresponding author: [up201606508@fe.up.pt](mailto:up201606508@fe.up.pt)

<sup>2</sup> Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands,  
Mekelweg 5, 2628 CD Delft, Netherlands

<sup>3</sup> CONSTRUCT, School of Engineering, Polytechnic of Porto, Portugal,  
R. Dr. António Bernardino de Almeida 431, 4249-015 Porto

<sup>4</sup> Institute of Roads and Bridges, Department of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, Poland  
Pl. Politechniki 1, 00-661 Warsaw, Poland

**Keywords:** metallic bridges, monotonic behaviour, retrofitting, CFRP.

The European Union has prioritized the safety, efficiency, and environmental friendliness of freight transport and people's mobility. However, fatigue damage is a critical cause of structural collapse on old metallic bridges. This damage can be caused by factors such as the weight of trains, the number of train crossings, and the environment. Due to economic factors, existing bridges may require the extension of their operational life. To achieve this, it is essential to thoroughly characterize the monotonic and fatigue behaviour of structural elements, both bare and reinforced with CFRP retrofitting techniques. In this study, elements representative of the Luiz I Bridge were subjected to preliminary experimental and numerical studies. The findings and data obtained from these studies demonstrate a marked improvement in both the static resistance and fatigue performance of the studied details with CFRP reinforcement. A parametric study was developed to compare the influence of the thickness of epoxy adhesive and CFRP plate.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the following grants: base funding – PTDC/ECI-EST/30103/2017 – POCI-01-0145 FEDER – 030103 – funded by FEDER funds through COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) and by national funds (PIDDAC) through FCT/MCTES; Ph.D. scholarship (2022.13575.BD), awarded to João Arrojado, by national funds (PIDDAC) through the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT/MCTES); and, individual project grant (2020.03856.CEECIND), awarded to José A.F.O. Correia, by national funds (PIDDAC) through the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT/MCTES).

---

# EKSPERYMENTALNO-NUMERYCZNA ANALIZA PROCESU DESTRUKCJI RUROCIĄGÓW GAZOWYCH. CZĘŚĆ 2. ANALIZA SYGNAŁÓW EMISJI AKUSTYCZNEJ

Grzegorz ŚWIT<sup>1</sup>, Anna ADAMCZAK-BUGNO<sup>1</sup>, Aleksandra KRAMPIKOWSKA<sup>1</sup>,  
Ihor DZIOBA<sup>2</sup> Sebastian LIPIEC<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Aleja 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce

<sup>2</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Aleja 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce

**Kontakt:** aadamczak@tu.kielce.pl

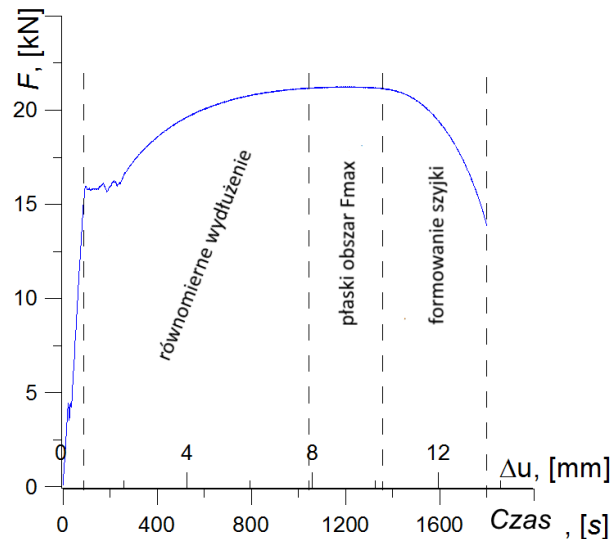
**Słowa kluczowe:** gazociągi stalowe, metoda emisji akustycznej, proces pęknięcia, niezawodność, monitoring

Żywotność rurociągów gazowych określa się w momencie projektowania biorąc pod uwagę m.in. warunki zapewnienia bezpieczeństwa urządzeń oraz prognozę zmian ich parametrów. Podczas wieloletniej eksploatacji elementy rurowe są stale obciążane mechanicznie i znajdują się pod wpływem czynników korozyjnych oraz oddziaływania wodoru [1–4]. Oddziaływania mechaniczne są związane z wywieraniem ciśnienia wewnętrznego przez gaz, a także obciążeniami zewnętrznymi o charakterze stałym, cyklicznym oraz wyjątkowym odnoszącym się do zdarzeń wypadkowych. Działanie czynników korozyjnych i wodorowych na materiał rurociągów może odnosić się do transportu gazu.

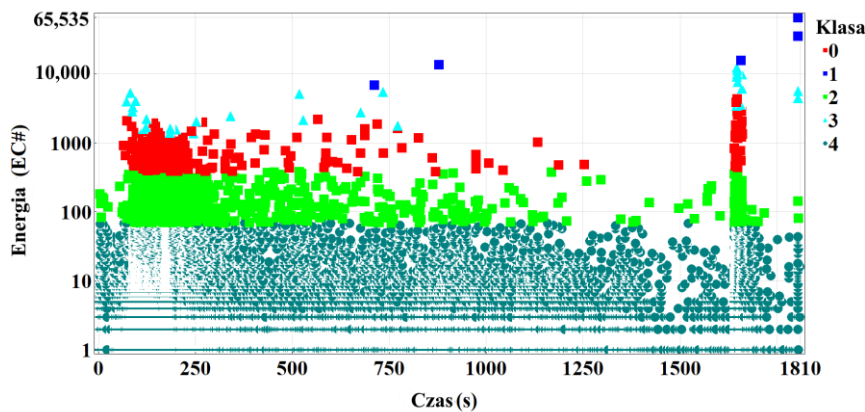
Długotrwały wpływ wskazanych powyżej warunków wpływa na powstawanie zmian w mikrostrukturze stali, z której są wykonane rury. Zmiany te dotyczą m.in. budowy fazowej oraz koagulacji cząstek wydzielen, powstania mikropęknięć i pęknięć o charakterze korozyjnym, a także dodatkowego ciśnienia w wierzchołkach lokalnych mikrodefektów wynikającego z oddziaływania wodoru [5–6]. Skutkiem wystąpienia omówionych czynników jest obniżenie parametrów stali rurociągów – charakterystyk mechanicznych, plastyczności oraz odporności na pęknięcie [7].

W projektowaniu rurociągów gazowych bierze się pod uwagę sytuację trwałą i przejściową. Nie zakłada się natomiast sytuacji ich awaryjnego zniszczenia. Wiadome jest jednak, że co pewien okres czasu zdarzają się stany awaryjne. Sposobem na ich uniknięcie i zapobieganie wypadkom może być prowadzenie monitoringu stanu rurociągów z zastosowaniem metod nieniszczących [8], szczególnie tych, które oparte są na analizie sygnałów emisji akustycznej (EA).

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w celu identyfikacji procesu niszczenia, próbek pobranych ze stali dwóch rurociągów wykorzystywanych do transportu gazu. Testowano próbki ze stali S235 i S355 poddawanych quasi-statycznemu obciążeniu – jednoosiowemu rozciąganiu do zniszczenia. Podczas obciążania, wraz z sygnałami siły i wydłużenia, rejestrowano sygnały emisji akustycznej (AE). Z próbek uprzednio poddanych obciążeniu pobierano wycinki i przeprowadzono również badania mikrostrukturalne, których celem było ustalenie charakteru destrukcji materiału przy różnych etapach odkształcania. Zarejestrowane sygnały AE analizowano metodą grupowania *k-means* oraz wykorzystując analizę czasowo-częstotliwościową. Zestawienie rezultatów badań metalograficznych i metod analizy sygnałów AE pozwoliło ustalić (zidentyfikować) widma częstotliwościowe charakterystyczne dla różnych etapów procesu zniszczenia materiału i porównać wyniki dla materiałów o różnych parametrach wyjściowych. Potwierdzono także, że metoda emisji akustycznej jest skutecznym narzędziem do oceny stanu stali rurociągów gazowych pracującej pod obciążeniem.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie przedziałów procesu niszczenia materiału S235 i S355 podczas jednoosiowego rozciągania



Rys. 2. Punktowy wykres klas sygnałów emisji akustycznej w czasie dla stali S235, dla parametru energii

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] NYKYFORCHYN H., LUNARSKA E., TSYRULNYK O., NIKIFOROV K., GABETTA G., *Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite steel*, Mater. Corros., 2009, 9, 716–725.
- [2] QUEJ-AKE L.M., RIVERA-OLVERA J.N., DOMÍNGUEZ-AGUILAR Y.D.R., AVELINO-JIMÉNEZ I.A., GARIBAY-FEBLES V., ZAPATA-PEÑASCO I., *Analysis of the physicochemical, mechanical, and electrochemical parameters and their impact on the internal and external SCC of carbon steel pipelines*, Materials, 2020, 13, 5771.
- [3] VODENICHAROV S., *Degradation of the physical and mechanical properties of pipeline material depending on exploitation term*. In: *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines*, G. Pluvinage, M.H. Elwany (Eds.), Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2008, 299–315.
- [4] LÓPEZ D., PÉREZ T., SIMISON S., *The influence of microstructure and chemical composition of carbon and low alloy steels in CO<sub>2</sub> corrosion. A state-of-the-art appraisal*, Mater. Des., 2003, 24, 561–575.
- [5] NAGUMO M., *Hydrogen related failure of steels a new aspect*, Mater. Sci. Technol., 2004, 20, 940–950.
- [6] JIANG Y., ZHANG B., ZHOU Y., WANG J., HAN E.-H., KE W., *Atom probe tomographic observation of hydrogen trapping at carbides/ferrite interfaces for a high strength steel*, J. Mater. Sci. Technol., 2017, 34, 1344–1348.
- [7] NYKYFORCHYN H., ZVIRKO O., TSYRULNYK O., KRET N., *Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination*, Eng. Fail. Anal., 2017, 82, 364–377.
- [8] ALVARO A., WAN D., OLDEN V., BARNOUSH A., *Hydrogen enhanced fatigue crack growth rates in a ferritic Fe-3 wt.% Si alloy and a X70 pipeline steel*, Eng. Fract. Mech., 2019, 219.

---

# FATIGUE BEHAVIOR OF 3D PRINTED Ti-6Al-4V SPECIMENS WITH SPHERIC STRESS CONCENTRATOR VOID FILLED WITH POWDER

Michał BÖHM<sup>1</sup>, Krzysztof KLUGER<sup>1</sup>, Tomasz OSIECKI<sup>2</sup>,  
Frank SCHUBERT<sup>2</sup>, Denis BENASCIUTTI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Opole University of Technology, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, Poland

<sup>2</sup> Department of Lightweight Structures and Polymer Technology, Chemnitz University of Technology,  
Reichenhainer Str. 31/33, D-09126 Chemnitz, Germany

<sup>3</sup> Department of Engineering, University of Ferrara, Via Saragat 1, 44122 – Ferrara, Italy

**Contact:** m.bohm@po.edu.pl

**Key words:** 3D printing, Ti-6Al-4V, fatigue of materials, new fatigue specimen

## 1. INTRODUCTION

Additive manufacturing, particularly 3D printing, has emerged as a revolutionary manufacturing technique with extensive applications across various industries. In recent years, the utilization of advanced materials, such as titanium alloys, has gained significant attention in 3D printing due to their exceptional mechanical properties and lightweight characteristics. Among these materials, Ti-6Al-4V (Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium) alloy stands out as a popular choice owing to its excellent combination of strength, corrosion resistance, and biocompatibility, making it suitable for aerospace, biomedical, and automotive applications. However, despite the advantages offered by the printing process and Ti-6Al-4V, there are challenges associated with the fatigue behavior such printed components [1, 2]. One prominent concern is the presence of stress concentrators, which can significantly influence the mechanical performance and fatigue life of these printed materials. In the context of 3D printing, stress concentrators may arise from voids or defects formed during the printing process, leading to localized stress concentrations that can initiate and propagate fatigue cracks. This research aims to investigate the fatigue behavior of 3D printed Ti-6Al-4V specimens containing a stress concentrator in the form of a spherical void filled with the printing powder. Understanding the influence of stress concentrators on the fatigue response is crucial for the reliable design and application of such components, especially in critical structural applications. Previous studies have focused on the mechanical properties of 3D printed materials; however, there is a lack of comprehensive research specifically addressing the fatigue performance of Ti-6Al-4V specimens with such stress concentrators and additionally filled with the powder. To achieve this goal, a series of fatigue tests under bending loading conditions have been conducted for fully printed and containing spherical voids diabolo specimens. The investigation explores the effects of void size, shape, and distribution on fatigue crack initiation and propagation. Advanced analytical techniques, such as X-ray tomography, has been employed to analyze the microstructural changes surrounding the stress concentrator and their influence on fatigue behavior. The outcomes of this study will provide valuable insights into the fatigue resistance and structural integrity of 3D printed Ti-6Al-4V components, contributing to the optimization and development of additive manufacturing processes. This research's findings will serve as a fundamental reference for engineers and designers seeking to implement printing with Ti-6Al-4V in critical applications, fostering the adoption of this promising technology in diverse sectors.

## 2. METHODOLOGY

This paper investigates the fatigue behavior of 3D printed Ti-6Al-4V specimens for two cases: fully printed and containing a stress concentrator in the form of a spherical void filled with the printing powder.

---

First of all the geometry of the specimen has been checked with the use of the Finite Element Analysis for the case where the specimens is filled with the powder. In order to perform a deeper analysis more material data was required directly from the material tests. All specimens have been printed with the use of the Selective Laser Melting Technology (SLM) in Chemnitz University of Technology, they were built in the direction of the z-axis (perpendicular to the surface). The first series of specimens contained fully printed 18 diabolo fatigue specimens and 5 tensile test specimens. The next series of specimens contained 18 diabolo specimens with a spherical void with the  $\varnothing 3$  diameter inside filled with the printing powder. All specimens undergone a heat treatment of  $675^{\circ}\text{C}$  for 4 hours under argon atmosphere. A series of mechanical tensile static tests have been performed in order to obtain an information about the tensile curve. The fatigue tests have been conducted under bending loading conditions to obtain two S-N fatigue curves (full and concentrator specimens). The results have been used in order to assess the effect of the stress concentrator on the mechanical performance and durability of the printed specimens. The authors have determined mechanical and fatigue properties and analyzed the specimens with the use of X-ray tomography as well as the surface topology with advanced analyzing equipment. The obtained X-ray 3D scans have undergone an void size and orientation analysis. A number of specimens have been cut after the tests in order to analyze the surface, micro scaffolds which appeared during the printing process.

### 3. RESULTS

The study explores the influence of void size, shape, and distribution on the initiation and propagation of fatigue cracks, providing crucial insights into the structural integrity of 3D printed components. The findings contribute to a better understanding of fatigue failure mechanisms in additive manufacturing and aid in optimizing the design and production of Ti-6Al-4V printed parts for practical applications. The fatigue behavior of 3D printed Ti-6Al-4V specimens with and without stress concentrators in the form of spherical voids filled with printing powder was thoroughly investigated through a series of mechanical tests and advanced analytical techniques. The geometrical analysis using Finite Element Analysis (FEA) revealed the viability of the specimen design for both cases - fully printed and containing the spherical void with  $\varnothing 3$  diameter filled with powder. The results from the fatigue tests revealed significant differences in the fatigue behavior of the two sets of specimens. The presence of the spherical void stress concentrator led to localized stress concentrations, resulting in reduced fatigue life compared to the fully printed specimens. In addition to the mechanical and fatigue tests, X-ray tomography was employed to analyze the microstructural changes surrounding the stress concentrator voids. The 3D X-ray scans allowed for void size and orientation analysis, providing valuable insights into the stress concentration mechanisms. Overall, the results indicated that the presence of spherical void stress concentrators in the 3D printed Ti-6Al-4V specimens significantly influenced their fatigue behavior, leading to reduced fatigue life compared to fully printed specimens. The findings from this study highlight the importance of considering stress concentrators and voids in the design and application of 3D printed components, particularly in critical structural applications. The comprehensive analysis of the microstructural changes and surface topology contributes to a deeper understanding of the fatigue resistance and structural integrity of 3D printed Ti-6Al-4V components, facilitating the optimization and development of additive manufacturing processes for improved reliability and efficiency.

### REFERENCES

- [1] CHERN A.H., NANDWANA P., YUAN T., KIRKA M.M., DEHOFF R.R., LIAW P.K., DUTY C.E., *A review on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting additive manufacturing*, International Journal of Fatigue, 2019, 119, 173–184.
- [2] STERLING A., SHAMSAEI N., TORRIES B., THOMPSON S.M., *Fatigue Behaviour of Additively Manufactured Ti-6Al-4V*, Procedia Engineering, 2015, 133, 576–589.

---

## FATIGUE BEHAVIOUR OF L-PBF 18NI300 STEEL UNDER VARIABLE-AMPLITUDE LOADING

Z. MARCINIAK<sup>1</sup>, R. BRANCO<sup>2</sup>, W. MACEK<sup>3</sup>, G. LESIUK<sup>4</sup>, C. MALÇA<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> Opole University of Technology, Department of Mechanics and Machine Design, Mikolajczyka 5, 45271 Opole, Poland

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, CEMMPRE, ARISE, Rua Luis Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

<sup>3</sup> Gdansk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Ship Technology, 11/12 Gabriela Narutowicza, Gdansk 80-233, Poland

<sup>4</sup> Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław, Poland

<sup>5</sup> Department of Mechanical Engineering, Polytechnic Institute of Coimbra, Rua Pedro Nunes, Coimbra, 3030-199, Portugal

<sup>6</sup> Centre for Rapid and Sustainable Product Development, Polytechnic Institute of Leiria, Rua de Portugal, Marinha Grande, 2430-028, Portugal

**Contact:** ricardo.branco@dem.uc.pt

**Keywords:** variable-amplitude loading, fracture surfaces, Smith–Watson–Topper model, Basquin–Coffin–Manson model, Palmgren–Miner damage rule

The cyclic deformation and fracture behaviour of 18Ni3000 maraging steel produced by laser beam powder bed fusion is studied under variable-amplitude loading. The tests were conducted under fully-reversed strain-controlled conditions considering a loading sequence composed of three ascending cycles and by three descending cycles repeated sequentially until failure. After the tests, fracture surfaces were examined using height and volume surface topography parameters to characterise the fractographic features. Fracture surfaces were also analysed through scanning electron microscopy to identify the main failure modes. Fatigue life was predicted by using the Smith–Watson–Topper and the Basquin–Coffin–Manson models with the Palmgren–Miner damage rule. The former approach was more accurate leading to mean errors close to zero. The values of the kurtosis parameter obtained from both sides of the fracture surfaces correlated well with the fatigue life. SEM analysis showed a mixed ductile-brittle mode of fracture with a predominance of brittle fracture. Crack initiation occurred from manufacturing defects located at the surface or near-surface.

---

# COMPARISON OF DIFFERENT AVERAGING METHODS AND DAMAGE LAWS IN MULTIAXIAL FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF NOTCHED COMPONENTS

R. BRANCO<sup>1</sup>, J.D. COSTA<sup>1</sup>, W. MACEK<sup>2</sup>, S.-P. ZHU<sup>3</sup>, G. LESIUK<sup>4</sup>, F. BERTO<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, CEMMPRE, ARISE, Rua Luis Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

<sup>2</sup> Gdansk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Ship Technology, 11/12 Gabriela Narutowicza, Gdansk 80-233, Poland

<sup>3</sup> School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China

<sup>4</sup> Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław, Poland

<sup>5</sup> Department of Chemical Materials, Environmental Engineering DICMA, Sapienza University of Rome, 00184 Roma, Italy

**Contact:** ricardo.branco@dem.uc.pt

**Keywords:** damage laws, fatigue lifetime, Neuber's rule, multiaxial cyclic plasticity

This paper aims to compare the predictive capabilities of different one-parameter damage laws and local stress–strain approaches to assess the fatigue lifetime in notched components subjected to proportional bending–torsion loading. The tested fatigue damage parameters are defined using well-known stress-based, strain-based, SWT-based and energy-based relationships. Multiaxial cyclic plasticity at the notch-controlled process zone is accounted for within a 3D-FE linear-elastic framework using three local stress-strain approaches, namely Neuber's rule, equivalent strain energy density rule (ESED) and the modified ESED rule. Regarding the local stress–strain approaches, irrespective of the fatigue damage parameter, Neuber's rule always led to more conservative results, and the modified ESED rule resulted in slightly better fatigue life predictions when compared to the original ESED rule. As far as the fatigue damage parameters are concerned, energy-based models were more accurate, irrespective of the local stress-strain approach.

---

# HYDRODYNAMICZNE SKUTKI USZKODZEŃ HYDRAULICZNYCH PRZEWODÓW ELASTYCZNYCH POD WPLYWEM OBCIĄZEŃ DYNAMICZNYCH. MODELOWANIE I EKSPERYMENT

Michał STOSIAK<sup>1</sup>, Mykola KARPENKO<sup>2</sup>, Paweł BURY<sup>1</sup>, Paulius SKAČKAUSKAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, 50-370 Wrocław, ul. Łukasiewicza 7/9

<sup>2</sup> Vilnius Gediminas Technical University, Faculty of Transport Engineering, Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, Lithuania,

**Kontakt:** [michal.stosiak@pwr.edu.pl](mailto:michal.stosiak@pwr.edu.pl)

**Słowa kluczowe:** obciążenia dynamiczne, przewód hydrauliczny, uszkodzenie zmęczeniowe, drgania, pękanie przewodów hydraulicznych

Układy hydrauliczne stosowane są w wielu gałęziach przemysłu. Ich zastosowanie jest bardzo szerokie i wciąż stanowią często niezastąpione elementy pełniąc bardzo odpowiedzialne funkcje. Pracująca maszyna robocza jest źródłem drgań mechanicznych o szerokim spektrum częstotliwości [1]. To prowadzi może m.in. do zmniejszenia dokładności pozycjonowania organów wykonawczych, nierównomierności pracy, skrócenia czasu eksploatacji maszyny. Pulsacja ciśnienia spowodowana jest też w układzie hydrostatycznym pracującą pompą wporową i jej pulsacją wydajności. Tak powstała pulsacja ciśnienia ma charakter okresowy. Częstotliwość tak powstałej pulsacji ciśnienia zależy od liczby elementów wporowych pompy i prędkości na wałku napędowym pompy. Natomiast amplituda zależna jest w dużym stopniu od amplitudy pulsacji wydajności i konfiguracji układu hydraulicznego, głównie pojemności przewodów hydraulicznych i ich długości. Obciążenia działające na elementy hydrauliczne są również dynamiczne, a w szczególności okresowe, jak np. pulsacja ciśnienia. Powoduje to wzbudzenie się okresowych drgań przewodów hydraulicznych. Drgające elastyczne przewody hydrauliczne niejednokrotnie ocierają o elementy maszyny, na której są zainstalowane lub o inne przewody znajdujące się bezpośrednio w ich otoczeniu. Prowadzi to często do uszkodzenia ścian przewodów elastycznych, ściany przecierają się i dochodzi do utraty szczelności przewodu, a w konsekwencji do awarii całego układu hydraulicznego. W takich przypadkach wymienia się cały przewód hydrauliczny lub gdy jest to ekonomicznie uzasadnione dokonuje się naprawy uszkodzonego przewodu stosując stalowe złącza naprawcze – rys. 1. Kolejnym newralgicznym z punktu widzenia możliwości uszkodzenia miejscem przewodu są ich zakucia. Bardzo często zdarza się, że na skutek obciążeń dynamicznych przewód hydrauliczny pęka w miejscu zakucia.

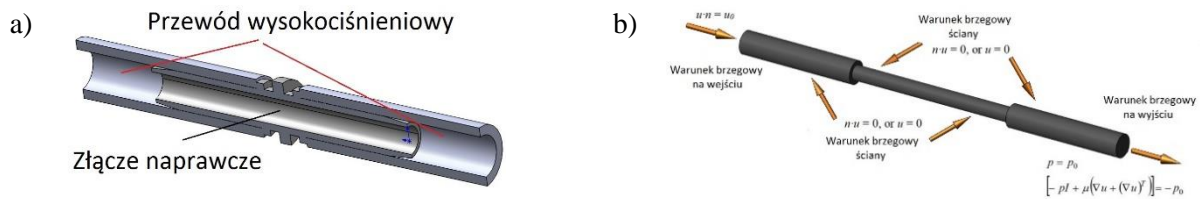


Rys. 1. Elastyczny przewód hydrauliczny: u góry – przewód nienaprawiany, u dołu – przewód naprawiany

Z konstrukcji elastycznego przewodu hydraulicznego wynika, że jego właściwości dynamiczne mają charakter nieliniowy. W pracy skupiono się na badaniach eksperymentalnych i modelowaniu numerycznym zjawisk hydrodynamicznych w elastycznych przewodach hydraulicznych poddawanych naprawie. Konieczność naprawy wynikała ze skutków obciążenia okresowego przewodu hydraulicznego pulsacją ciśnienia wewnętrznego. Rozważania symulacyjne i doświadczalne przeprowadzono dla przewodu z jednym złączem naprawczym. Jako obiekt odniesienia wykorzystano przewód nieuszkodzony. Analizowano prędkość drgań przewodu, a w rozważaniach symulacyjnych rozkład ciśnienia i prędkości przepływu wewnątrz przewodu. Analizy symulacyjne koncentrowały się na odcinku przewodu, w którym znajduje się złącze naprawcze. Na potrzeby symulacji numerycznej utworzono przekrój modelu 3D



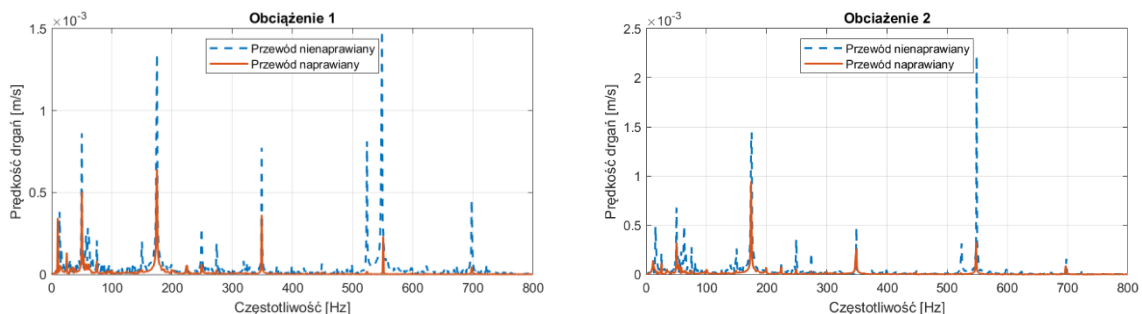
przewodu wysokociśnieniowego ze złączem naprawczym [2]. Przekrój w połączeniu złączki naprawczej i przewodu wysokociśnieniowego pokazano na rys. 2a. Na rysunku 2b pokazano zastosowane warunki brzegowe użyte do rozwiązania ściślejszych równań Naviera–Stokesa ze standardowym modelem turbulencji  $k-\varepsilon$  do symulacji przepływu płynu wewnątrz przewodów wysokociśnieniowych.



Rys. 2. a) Przekrój na połączeniu złącza naprawczego i przewodu wysokociśnieniowego, b) warunki brzegowe symulacji przepływu w oprogramowaniu Ansys® Fluent®

Symulacja numeryczna przepływu płynu wewnątrz przewodów wysokociśnieniowych została opracowana przy użyciu Ansys® Workbench®. Kod numeryczny został oparty na metodzie objętości skończonych. Badany obszar obejmował objętość 3D zamkniętą ze wszystkich stron i podzieloną na czworokąty. Siatka została udoskonalona w pobliżu zmian w obszarze przekroju poprzecznego i wokół obiektów ograniczających.

W badaniach doświadczalnych oceniono wpływ natężenia przepływu, średniego ciśnienia i naprężenia wstępnego na amplitudę prędkości drgań przewodu. Drgania przewodu były wymuszane przez pulsujący przepływ płynu roboczego. Do przeprowadzenia badań zaprojektowano i zbudowano oryginalne stanowisko badawcze ze zintegrowanym wielokanałowym torem pomiarowym do pomiaru i rejestracji następujących parametrów: natężenie przepływu, ciśnienie na początku i końcu badanego przewodu (składowa stała i zmienna), przemieszczenie osiowe przewodu, siła reakcji w podporach, temperatura płynu wewnątrz przewodu (na początku i końcu przewodu) oraz prędkość drgań przewodu. Przykładowe wyniki dla ciśnienia 80 bar i naciągu 100 N przy zmiennym przepływie przedstawione są na rysunku 3.



Rys. 3. Porównanie widma prędkości drgań przewodu nienaprawianego i naprawianego poddanych różnym obciążeniom: Obciążenie 1 – 6,5 l/min, Obciążenie 2 – 10 l/min

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] STOSIAK M., KARPENKO M., PRENTKOVSKIS O., DEPTUŁA A., SKAČKAUSKAS P., *Research of vibrations effect on hydraulic valves in military vehicles*, Defence technology. Beijing: KeAi Publishing LTD., ISSN 2096-3459, In Press (2023), pp. 1–15.
- [2] KARPENKO M., BOGDEVIČIUS M., *Investigation into the hydrodynamic processes of fitting connections for determining pressure losses of transport hydraulic drive*, Transport. Vilnius: VGTU Press, ISSN 1648-4142, Vol. 35, Iss. 1 (2020), pp. 108–120.

---

# INFLUENCE OF COLLISIONS OF SUSPENSION SYSTEM SUBCOMPONENTS ON DESIGN FATIGUE LIFE

Karol CZEKAJ<sup>1,2</sup>, Adam NIEŚLONY<sup>2</sup>, Robert OWSIŃSKI<sup>2</sup>, Artur DZIURA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Opole University of Technology, ul. Prószkowska 76, 45-758, Opole, Poland

<sup>2</sup> ZF CV Systems Poland Sp. z o.o., ul. Ostrowskiego 34, 53-238, Wrocław, Poland

**Contact:** karol.czekaj@doktorant.po.edu.pl, a.nieslony@po.edu.pl, r.owsinski@po.edu.pl, artur.dziura@zf.com

**Keywords:** vibration fatigue, mechanical collision, PSD, non-linear

## 1. ABSTRACT

In this work the nonlinear dynamic response of a suspension system used in automotive industry is studied. The research is focused on the impact of collisions on the dynamic response of the system, particularly on the changes on power spectral density function. The mechanical system can be represented as one DOF system, consisting of vibrating mass, spring, rubber bearing and two bumpers. During working conditions, the structure operates either close to or at its natural frequency which leads to the rubber-bumpers collisions even under low level excitations. Two variants of suspension systems were investigated, linear variant without collisions, and nonlinear variant with subcomponents collisions. Both variants were compared to each other to evaluate collisions impact itself on the general system dynamic response.

Based on the measurements results finite element method simulation was performed to assess collisions effect on the fatigue life of a notched sample attached to the investigated structure.

## 2. INTRODUCTION

Random vibration tests are one of the basic tests to check the structure durability in the automotive industry. During such tests elements of machines are subjected to irregular loading over time which can result in so-called fatigue damage.

There are 2 approaches to assess fatigue damage under random vibrations: the time domain approach and the frequency domain approach. The first approach uses the stress time history as input. Using algorithms such as rainflow [1] a distribution of stress amplitudes can be obtained. To assess the lifetime according to this distribution, S-N curve, which characterizes the material strength for constant amplitude loadings and Palmgren-Miner rule for fatigue damage summation [2] is used. This approach requires a long computational time and for Finite Element Method (FEM) models with large number of nodes becomes ineffective or useless.

The second approach called as well spectral methods is entirely defined in the frequency domain. These methods use the Power Spectral Density (PSD) to describe the stress amplitudes and are based on statistical information regarding the loading. The cycle's distribution is estimated with a probability density function and depends on PSD parameters and used spectral method. The most widely used methods were proposed by Dirlik [3] and Tovo-Benasciutti [3]. Spectral methods for fatigue life calculations are accurate and efficient even for complex FEM models. However, FEM Frequency Response Analysis (e.g., Nastran SOL 111, Ansys Harmonic Response) used as an input for the spectral methods are a linear simulations and do not consider structure nonlinearities. This creates a need of modifying the linear FEM model or its loading to adjust the linear dynamic response to the real one. The purpose of

this work was to consider in fatigue spectral methods contact nonlinearities during vibrations for the investigated mass suspension system.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The system (Fig. 1a) was excited with the same PSD loading in 2 ways: with and without possibility of subcomponents collisions. Collision effect was controlled via gap value between rubber bearing and bumpers. It enables to investigate collision impact itself on the general system dynamic response. Tests results clearly show different shape of PSD response for the system which works with collisions compared to the linear model (Figs. 1b and 1c). It was observed that nonlinearity in the PSD response function appears with two additional peaks regardless of the excitation level compared to the model without collisions.

Obtained results were used to simulate lightweight notched sample tightened to the vibrating mass. It was assumed that neglectable mass of the sample (0.006 kg) has no impact on the response of the vibrating mass (1.2 kg). In opposite to that vibrating mass excites the samples. For such conditions the sample can be simulated separately as a single part and be loaded with the power spectral density measured on the vibrating mass during the test. Respectively to that, Random Vibration Calculations were performed using as the input load the PSD response obtained by exciting the test rig with RMS load 0.25 g.

Additional peaks lead to an increase in the standard deviation of the stresses observed near the base of the specimen notch (Fig. 1c), which significantly affects computed fatigue life. In the case of the material used for the simulation, the fatigue life was reduced by a factor of near one thousand. Both the random vibration methods used, i.e., Dirlik and Tovo-Benasciutti, gave similar fatigue life.

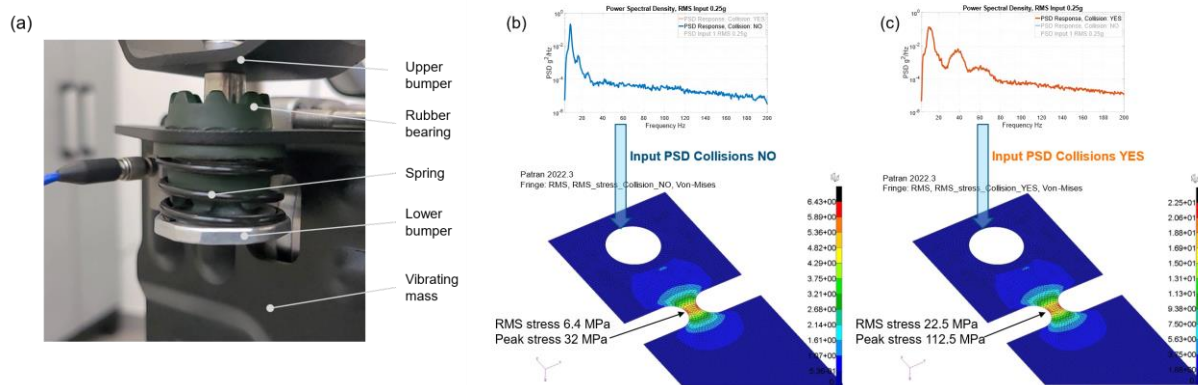


Fig. 1. (a) Suspension system, (b) Test and simulation results without collisions, (c) Test and simulation results with collisions

### REFERENCES

- [1] DOWNING S., SOCIE D., *Simple rainflow counting algorithms*, International Journal of Fatigue, 1982, Vol. 4, No. 1, 31–40.
- [2] FATEMI A., YANG L., *Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials*, International Journal of Fatigue, 1998, Vol. 20, No. 1, 9–34.
- [3] DIRLIK T., BENSCIUTTI D., *Dirlik and Tovo-Benasciutti Spectral Methods in Vibration Fatigue: A Review with a Historical Perspective*, Metals, 2021, 11, 1333.

---

# FATIGUE BEHAVIOR OF CFRP THIN-WALLED TUBES: AN EXPERIMENTAL STUDY WITH DAMAGE ANALYSIS BASED ON THE ACOUSTIC SIGNALS

Szymon DUDA, Grzegorz LESIUK, Michał SMOLNICKI, Paweł STABLA,  
Paweł ZIELONKA, Joanna WARYCHA, Grzegorz ZIÓLKOWSKI

Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław, Poland

**Contact:** szymon.duda@pwr.edu.pl

**Keywords:** CFRP, thin-walled structures, acoustic emission, fatigue behavior

## 1. INTRODUCTION

The rapid growth of the use of composite materials in many industrial sectors requires a detailed and comprehensive design process. This process is very demanding in terms of structural application due to the safety and reliability requirements. This design process is highly complex because of the multiaxial stress states caused by material anisotropy. In reality, this stress state is also compounded by multiaxial alternating loading conditions acting on the physical objects. Therefore, understanding the fatigue behavior of composite materials under external multiaxial loads is crucial in many mentioned applications for guaranteeing long-term service [1].

The investigated research concerns the experimental-numerical characterization of multiaxial fatigue behavior of thin-wall tubular carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) structures under tension/torsion non-proportional loading conditions. The filament winding method has been applied to manufacture samples with fiber orientation  $[+/-30^\circ]$ . Acquired data from the experiment and results from acoustic emission allowed for defining material lifetime cycles, and estimating the failure modes.

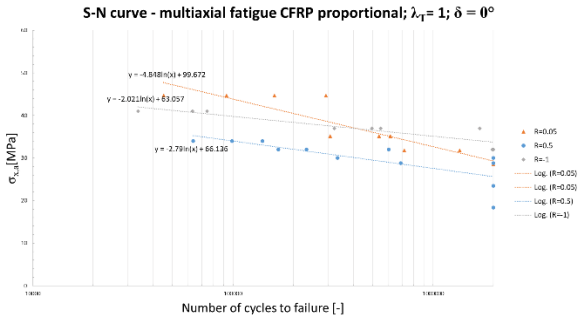
## 2. METHODS AND RESULTS

The methods used within the research framework include the experiments and analysis of the acoustic emission signals. The thin-walled tubes manufactured by the filament winding method have been subjected to reference proportional and non-proportional (phase shifting  $45^\circ$  and  $90^\circ$ ) axial and torsional loading under various stress ratios ( $R = -1$ ,  $R = 0.05$ ,  $R = 0.5$ ) and for a  $\lambda_T$  – biaxiality (the ratio between geometrical stresses  $\sigma_{xy}$  and  $\sigma_x$ ) ratio equal to 1. Simultaneously within the experiment, the acoustic emission is applied to acquire acoustic waves caused by the failures inside material. This method is further used for the analysis of the material lifetime stages and failure mechanics acting within the particular lifetime.

Obtained results from multiaxial fatigue are presented in Fig. 1. Presented S-N curves are approximated by linear regression.

The presented results show the mean stress effect, the lower stress ratio (0.05) exhibits better fatigue performance in terms of the amplitude stress level. In terms of the results for  $R = -1$ , the situation is more complex due to the possibility of buckling. Further investigation will be conducted to elaborate this phenomenon.

a)



b)

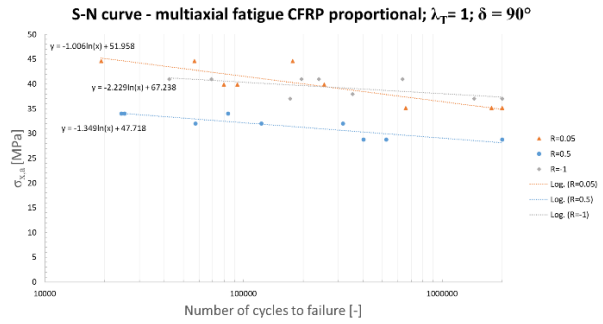


Fig. 1. Fatigue curves for a) proportional and b) nonproportional ( $90^\circ$ ) multi-axial fatigue testing of CFRP [30/30] on tubular specimens at load ratio  $R = -1$ ,  $R = 0.05$  and  $R = -1$  in room temperature

#### ACKNOWLEDGMENT

This research was funded in whole or in part by the Polish National Science Centre Grant No. 2021/41/N/ST8/03365. Calculations have been carried out using resources provided by Wrocław Centre for Networking and Supercomputing (<http://wcss.pl>), Grant No. 531.

#### REFERENCES

- [1] Quaresimin M., Susmel L., and Talreja R., *Fatigue behaviour and life assessment of composite laminates under multi-axial loadings*, Int. J. Fatigue, Vol. 32, No. 1, pp. 2–16, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.02.012.

---

# WPŁYW MEDIUM RETARDACYJNEGO NA PRZEBIEG PROCESU PROPAGACJI PĘKANIA METALOWYCH ELEMENTÓW WYTWARZANYCH METODAMI PRZYROSTOWYMI

Szymon DZIUBA, Grzegorz LESIUK

Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej. Politechnika Wrocławska,  
Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Polska

**Kontakt:** szymon.dziuba@pwr.edu.pl

**Słowa kluczowe:** metody przyrostowe, materiały metaliczne, zamykanie pęknięć zmęczeniowych, medium retardacyjne

Elementy wytwarzane przy użyciu technologii przyrostowych są stosowane w takich gałęziach przemysłu jak medycyna, lotnictwo czy branża kosmiczna. Takim materiałom często stawia się takie wymagania jak na przykład: wysoka wytrzymałość, szeroki zakres temperatur pracy, odporność na korozję, zmęczenie oraz pękanie [1].

Zważywszy na wciąż istniejącą lukę w opisie zmęczenia i mechanice pękania takich materiałów oraz sposobach jej zapobiegania, zaproponowano zastosowanie płynu zapobiegającego pękaniu. Jest on oryginalną i opatentowaną cieczą, zawierającą składnik aktywny, która po zaaplikowaniu zaczyna oddziaływać chemicznie z metalową powierzchnią pęknięcia. W wyniku interakcji płynu z powierzchnią pęknięcia powstaje produkt, w postaci stałej, o pewnej objętości, który wypełnia jamę pęknięcia.

W publikacji [2] została zastosowana ów mieszanina w celu wywołania zjawiska sztucznego zamykania pęknięć. W rezultacie spowolniono rozwój pęknięcia próbki CT ze stali niskowęglowej. Proces pęknięcia zmęczeniowego został powiązany z siłą napędową pęknięcia i jej miejscowym stanem. Na podstawie koncepcji  $\Delta K_{eff}$ , można wyjaśnić zmniejszanie się tempa wzrostu pęknięć wraz z efektywnym współczynnikiem intensywności naprężeń (koncepcja zamknięcia pęknięć). W wyniku działania płynu nastąpiło zamknięcie pęknięć zmęczeniowych, które istotnie zmniejszyło siłę napędową, a ostatecznie spowodowało zmniejszenie ich wzrostu. Mechanizm chemiczny, na którym opiera się ta metoda, jest podobny do samoistnego zamykania pęknięć spowodowanych przez produkty interakcji między metalem a wilgotnym powietrzem lub środowiskiem korozyjnym w wyniku korozji ciernej. Jedną z zalet technologii przyrostowych, w porównaniu z metodami konwencjonalnymi, jest swoboda projektowania elementu. Pozwala to zastosować zaprojektowany system kanałowy, którym płyn będzie dostarczony w miejsca narażone na pęknięcia.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] HERZOG D., SEYDA C., WYCISK E., EMMELMANN C., *Additive manufacturing of metals*, Acta Mater., 2016, Vol. 117, 371–392.
- [2] LESIUK G. et al., *Analysis of the deceleration methods of fatigue crack growth rates under mode I loading type in pearlitic rail steel*, Metals., 2021, Vol. 11, No. 4, 1–13.

---

# APPLICATION OF THE THEORY OF CRITICAL DISTANCES FOR NOTCH EFFECT ANALYSIS IN SPRING STEEL

Vítor M.G. GOMES<sup>1</sup>, José A.F.O CORREIA<sup>1</sup>, Grzegorz LESIUK<sup>2</sup>, Abílio M.P. de JESUS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering of the University of Porto, R. Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal

<sup>2</sup> Wrocław University of Science and Technology, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

**Contact:** vtgomes@fe.up.pt

**Keywords:** Notch Effect, Mean Stress Effect, Fatigue, Spring Steel, Theory of Critical Distances, Cyclic Plastic Zone

## 1. INTRODUCTION

Many studies have demonstrated that spring steel components, when properly treated, may achieve very high levels of mechanical and fatigue resistance. Despite their high mechanical and fatigue strength, fatigue studies have shown that these steels are susceptible to the presence of notches, surface defects, or high levels of surface roughness. In the case of leaf spring components, the surface condition is crucial to the component's performance during its service life. With the growing requirement to optimise mechanical design, such as energy costs related to vehicle weight, alternative leaf springs with more complicated geometry have been created for this reason. This geometry incorporates various curvatures along its length and geometric notches for alignment and fastening. Because of the high criticality of this geometric notch, fatigue resistance experiments have been conducted.

## 2. METHODS

The theory of critical distances is considered to characterise the fatigue phenomena. The effective stress is determined considering the intrinsic defect's size, considering the fracture mechanics theory. Since in geometric notches, the stress/strain state is multiaxial, von Mises criterion is considered to correlate the fatigue dataset obtained in notched and smooth specimens. Fatigue tests are running both under bending and tensile conditions for different load ratios. The results are further corrected by applying the cyclic plasticity zone concept.

## 3. CONCLUDING REMARKS

This investigation allowed the evaluation of the notch effect in the fatigue strength of the spring steel under bending and tensile loading conditions. The effective stresses/strains in the notches were estimated using the line technique based on the theory of critical distances, considering the profile of elastic stresses in front of the notch root. The results of the various tests were integrated with the failure data from smooth specimens to create a master curve based on an effective damage parameter. The combined model (smooth plus notch) with the Walker damage parameter given by the von Mises equivalent strain demonstrated high agreement between the failure data in smooth and notch specimens. A better agreement was achieved considering the cyclic plastic zone and the monotonic plastic zone concept.

---

# OPTIMIZATION OF WING-FUSELAGE CONNECTING LUG GEOMETRY IN RESPECT TO ITS FATIGUE LIFE

A. GRBOVIC, A. SOLOB, A. SEDMAK

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11000 Belgrade, Serbia

**Corresponding author:** asedmak@mas.bg.ac.rs

Optimization of wing-fuselage connecting lug geometry in respect to its fatigue life is presented. The initial geometry dimensions of the attachment lug, including the finite element mesh is shown in Figure 1. Both FEM and xFEM were used to calculate stress state and number of cycles to failure, respectively.

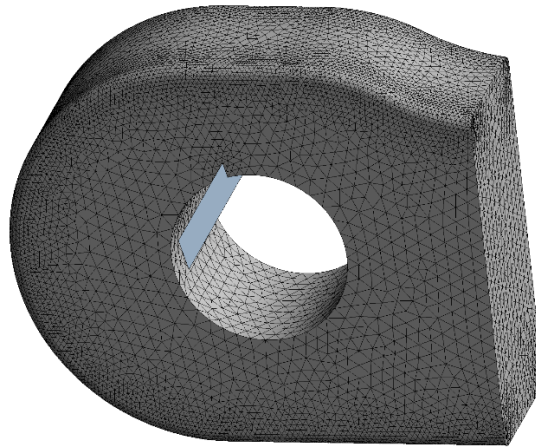


Fig. 1. Finite element mesh used in optimization

Alternative designs of the wing-fuselage attachment were analyzed with the goal of achieving longer fatigue life of the damaged lug (fail-safe approach). Several geometrical parameters have been changed during the redesign process with a predefined target: increase of the number of cycles until complete failure. The new proposed design of lug brings increased mass (but not a significant increase when compared to the mass of whole attachment), but significantly improved fatigue life which reduces the possibility of lug failure before the crack is observed in regular maintenance inspections.



---

# INFLUENCE OF MECHANICAL AND HYBRID POST PROCESSING ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF AN ADDITIVELY MANUFACTURED ALUMINIUM ALLOY

Mario GUAGLIANO

Dept. Mechanical Engineering, Politecnico Milano (Italy), Via La Masa, 1 – 201456 Milano

**Contact:** mario.guagliano@polimi.it

**Keywords:** additive manufacturing, mechanical treatments, mechanical properties

Metal additive manufacturing is gaining increasing attention due to its ability to fabricate parts of intricate geometries with customized features for a wide range of applications. However, the mechanical properties of materials and parts obtained with AM processes are generally not satisfactory and post-processing is needed. Mechanical treatments are among the more attractive processes due to their cost, flexibility and reduced environmental impact.

In this presentation, different mechanical treatments are considered for post processing of ALSi10Mg manufactured by LPBF, also in combination with chemical or electrochemical methods with the aim to investigate synergic effects of hybrid treatments.

After the description of the treatments, their effect on the microstructural and mechanical properties of the treated materials is critically discussed and assessed and some guidelines for the correct choice of the post processing methods with respect of the properties of interest is drawn.

---

# A METHODOLOGY FOR THE FATIGUE CHARACTERIZATION OF PARABOLIC LEAF SPRINGS IN FREIGHT WAGONS

Vítor M.G. GOMES<sup>1</sup>, José A.F.O. CORREIA<sup>1</sup>, Grzegorz LESIUK<sup>2</sup>, Abílio M.P. de JESUS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering of the University of Porto, R. Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal

<sup>2</sup> Wrocław University of Science and Technology, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

**Contact:** ajesus@fe.up.pt

**Keywords:** railway, fatigue, freight wagons, suspension of parabolic leaf springs, spring steel

## 1. INTRODUCTION

Railway freight has significantly influenced the global economy throughout the years. This mode of goods transportation has shown to be one of the measures for decreasing the carbon footprint and, as a result, assisting in the prevention of climate change. Despite the immense benefits of this industry, in some countries, this sector still needs to be updated with new technological and scientific innovations to overcome the loss of competitiveness of the sector for road transportation. With the decreasing interest in investing in this sector, rolling stock components have become obsolete, and some issues linked to poor maintenance practices have arisen. Some problems can be associated with failures by fatigue in leaf springs. Failure of critical components, such as leaf springs, can result in train derailments and, as a result, economic and human losses.

## 2. METHODOLOGY

Since leaf springs have critical importance for safety, a methodology for assessing the fatigue performance of leaf spring suspensions for freight wagons is presented in this investigation. This investigation aims at analysing the fatigue performance of spring steel as well as the structural response of leaf springs. The procedure is divided into 3 parts, material characterisation, structural response analysis, and fatigue failure prediction under actual operating conditions.

### **Material characterisation**

A basic characterisation of mechanical properties is initially made, and the fatigue analysis is performed posteriorly. Fatigue performance analysis is conducted with probabilistic models representing the chance of material failure due to random service circumstances and geometric conditions of leaf springs, such as notches and excessive surface roughness. Because leaf springs are subjected to bending loading circumstances and high load ratios, these conditions were investigated using rotating bending and 3-point in-plane bending. Furthermore, because these components are expected to run for millions of cycles, the VHCF regime was investigated in addition to the HFC. The fatigue resistance study was supplemented by tests on notched specimens under rotating bending, 3-point in-plane bending, and uniaxial loading. The mean stress effect and the notch effect, the combination of loading type, were also included in the analysis. The characterization of spring steel is enriched by including an investigation of crack propagation behavior based on elastic linear fracture mechanics, resistance to elastoplastic fatigue, and cyclic plasticity models in the research.

---

### **Structural response analysis**

With respect to the structural response of leaf springs, full-scale testing was carried out to obtain the characteristic curve and the surface stress distribution profile in the master leaf of the parabolic leaf spring used in freight wagons. Cyclic experiments were also conducted to observe how frequency and cyclic loadings affect leaf spring response. To enable more extensive studies, a numerical model was created. Furthermore, the initial stress condition caused by the leaf assembly process and surface treatment by stress shot peening on the leaves was investigated. Electric strain gauges and X-ray diffraction were also applied.

### **Fatigue failure prediction under actual operating conditions**

Lastly, the fatigue behaviour of the leaf spring under real-operating conditions was investigated. The generated numerical model was used with data from an experimental monitoring campaign of a freight wagon to forecast fatigue damage to leaf springs. This investigation took into account previously existing prediction models and cycle-counting methodologies.

---

# COMPARISON OF FATIGUE CRACK PROPAGATION RATES IN HIGH STRENGTH STEEL S460, S690 AND S960 UNDER STRESS RATIO $R = 0.1$

Mohammad S. AL KHAZALI<sup>a, b, 1</sup>, Stanislav SEITL<sup>a, b, 2</sup>, Pavel POKORNÝ<sup>a, 3</sup>,  
Grzegorz LESIUK<sup>c, 4</sup>, Szymon DZIUBA<sup>c, 5</sup>

<sup>a</sup> Institute of Physics of Materials Czech Academy of Sciences, v. v. i. Žitkova 513/22, 616 00 BR, CZECH REPUBLIC

<sup>b</sup> Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veverí 331/95, 602 00 BRNO, CZECH REPUBLIC

<sup>c</sup> Wrocław University of Science and Technology, Department of Mechanics, Materials and Biomedical Engineering,  
Smoluchowskiego 25 St. PL 50-370 WROCLAW, POLAND

**Contact:** <sup>1</sup>mohammad.al.khazali@vutbr.cz, <sup>2</sup>seitl@ipm.cz, <sup>3</sup>pokorny@ipm.cz, <sup>4</sup>grzegorz.lesiuk@pwr.edu.pl,  
<sup>5</sup>szymon.dziuba@pwr.edu.pl

**Key words:** High-strength steel, fatigue, stress intensity factor range, propagation rate, Paris law, S460, S690, S960

High-strength steel (HSS) is a highly prevalent material in structural engineering owing to its exceptional mechanical characteristics, encompassing remarkable strength, stiffness, and toughness. It finds extensive application in structures exposed to repeated loading, such as bridges, offshore platforms, and wind turbines, where fatigue-induced damage is a considerable consideration. The objective of this research is to analyze the fatigue performance of three HSS grades: S460, S690, and S960, when subjected to stress ratio  $R = 0.1$ .

By subjecting the HSS samples to fully reversed axial loading at a frequency of 10 Hz, we carefully recorded the number of cycles leading to failure. To gain insights into the fatigue behaviour of the specimens, we employed the Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) technique to determine the stress intensity factor range,  $\Delta K$  ( $R = 0.1$ ). Moreover, the ASTM E647 standard was employed to set the threshold value of  $\Delta K_{th}$  for the HSS grades S460, S690, and S960. By analyzing the data with the Paris equation and curve, we established a mathematical relationship between the crack growth rate and the stress intensity factor range, further understanding the propagation rate of fatigue cracks.

The data obtained from the tests were meticulously analyzed to assess the reliability of the test results and to estimate the fatigue life of HSS structures. In addition to Crack Mouth Opening Displacement (CMOD), a comprehensive comparison was conducted using different approaches. This comparison involved evaluating the  $\Delta K$  threshold values and fatigue crack propagation rates for the various HSS grades. By examining these parameters, valuable insights were gained into the fatigue behavior of the HSS grades and their suitability for diverse structural applications under cyclic loading conditions. The obtained results are compared with data from literature and discussed.

## ACKNOWLEDGMENT

The research is supported by the Czech Science Foundation, through the project “Influence of material properties of high strength steels on durability of engineering structures and bridges”, project No. 21-14886S and specific research of Brno University of Technology No. FAST-S-23-8216 – “Analysis of the fatigue behavior of high-strength steels damaged by different degrees of corrosion”.

---

# WPLYW OBRÓBKI WYBUCHOWEJ NA NISKOCYKLOWĄ WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ POŁĄCZEŃ FSW STOPU AA7075-T651

Robert KOSTUREK<sup>1</sup>, Lucjan ŚNIEŻEK<sup>1</sup>, Janusz TORZEWSKI<sup>1</sup>,  
Rafał LEWCZUK<sup>2</sup>, Tomasz ŚLĘZAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

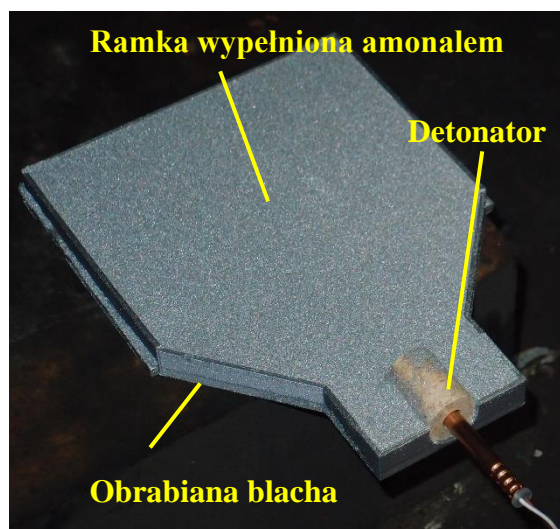
<sup>2</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Przemysłu Organicznego, ul. Annopol 6, 03-236 Warszawa

**Kontakt:** robert.kosturek@wat.edu.pl

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie tarciove z przemieszaniem, aluminium, obróbka wybuchowa, wytrzymałość zmęczeniowa

## 1. WSTĘP I METODYKA

Wykonywanie połączeń spójnościowych stopu AA7075-T651 techniką zgrzewania tarciovego z przemieszaniem (ang. FSW – *friction stir welding*) wiąże się ze spadkiem jego właściwości wytrzymałościowych na skutek przestarzenia fazy umacniającej. Autorzy proponują post-procesową obróbkę połączeń zgrzewanych w formie wybuchowego umacniania, która pozwala na poprawę wybranych właściwości mechanicznych (np. granicy plastyczności). Połączenie FSW 5 mm blachy stopu AA7075-T651 zostało wykonane przy parametrach procesu: 400 obr/min prędkości obrotowej narzędzia i 100 mm/min prędkości zgrzewania. Po procesie zgrzewania, połączona blacha została poddana wybuchowemu umacnianiu w układzie przedstawionym poniżej (rys. 1).

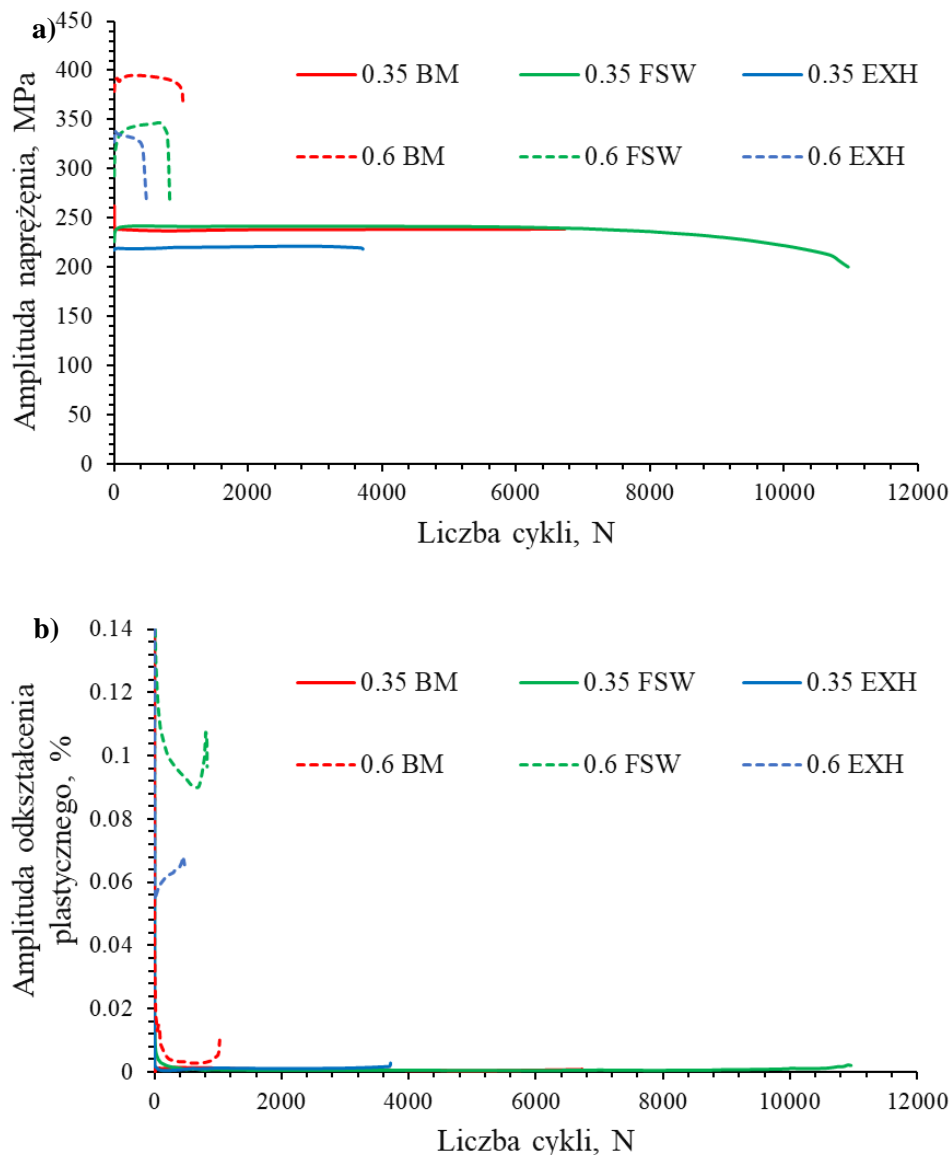


Rys. 1. Układ do wybuchowego umacniania

Wykorzystanym materiałem wybuchowym był amonal o prędkości detonacji ok. 2150 m/s. Po wybuchowej obróbce zgrzewana blacha została przebadana w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej na amplitudach odkształcenia całkowitego: 0,35%, 0,4%, 0,5% i 0,6% przy współczynniku asymetrii cyklu  $R = 0,1$ .

## 2. WYBRANE WYNIKI I WNIOSKI

Przykładowe przebiegi zmęczeniowe materiału rodzimego (BM), połączenia FSW w stanie po zgrzewaniu (FSW) oraz po obróbce wybuchowej (EXH) przedstawiono poniżej dla różnych amplitud odkształcenia całkowitego (rys. 2a, b).



Rys. 2. Amplituda naprężenia (a) oraz odkształcenia plastycznego (b) w funkcji liczby cykli dla wybranych próbek

Zrealizowana obróbka post-procesowa ma wpływ na niskocyklowe zmęczenie rozpatrywanego połączenia FSW. Na niższych amplitudach odkształcenia całkowitego (0,35%), próbka poddana obróbce wybuchowej wykazuje cykliczną stabilność, przy tym odznaczając się jednak niższą wartością amplitudy naprężenia oraz niższą liczbą cykli do zniszczenia. W przypadku wyższych amplitud odkształcenia całkowitego (0,6%) połączenie umocnione wybuchem przejawia cykliczne osłabienie aż do zniszczenia. Wykazuje przy tym wartość amplitudy odkształcenia plastycznego pośrednią między materiałem rodzimym a nieobrobionym połączeniem FSW, co pośrednio potwierdza efekt umocnienia zgrzeiny wybuchem.

---

# WYZNACZANIE OBSZARU BRAKU DZIAŁANIA KARBU NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ STOPU AA2519 T62

Maciej KOTYK, Przemysław STRZELECKI

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

**Kontakt:** maciej.kotyk@pbs.edu.pl

**Słowa kluczowe:** wysokocyklowe zmęczenie, współczynnik działania karbu, spiętrzenie naprężeń, obszar niewrażliwości, model trwałości

## 1. STOP ALUMINIUM AA2519 T62

Obiekty inżynierskie pomimo szerokiego zróżnicowaniu głównie ze względu na przeznaczenie mają pewną cechę wspólną. Podczas konstruowania dąży się, aby opracowywany obiekt charakteryzował się możliwe najmniejszą masą, bez utraty własności mechanicznych jak np. sztywność, czy zdolność do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych. W niektórych zastosowaniach takich jak lotnicze i kosmiczne opisywane zagadnienie ma szczególne znaczenie, głównie ze względu na energochłonność statków powietrznych, które trzeba rozpędzić do znacznie większych prędkości niż te, występujące w ruchu kołowym.

Historyczne pewnego rodzaju przełomem w dobieraniu materiałów inżynierskich uwzględniających korzystniejszy w odniesieniu do stali stosunek gęstości do wytrzymałości było opracowanie przez Alfreda Wilma pierwszego duraluminium [1]. Przyczyniło się to w późniejszym czasie do powstawania zaawansowanych, lekkich struktur lotniczych i kosmicznych [2], w tym o charakterze militarnym [3].

Interesującym materiałem z tej grupy ze względu na własności technologiczne oraz mechaniczne takie jak wysoka wytrzymałość właściwa, odporność balistyczne i odporność na korozję naprężeniową jest stop AA2519 [4–10]. Wspomniane cechy mechaniczne oraz opracowanie technologii spawania arkuszy blach wykonanych z tej serii sprawiło, że jest to materiał który z powodzeniem może być stosowany w lekkich pojazdach opancerzonych oraz lotnictwie [11]. Ze względu na istotnie niższą masę tego stopu w odniesieniu do stali, rozważano wykonywanie z tego materiału panczerzy statków powietrznych [12].

Ze względu na opracowanie technologii wytwarzania kompozytu złożonego ze stopu tytanu Ti6Al4V oraz opisywanego stopu AA2519 zaobserwowano zwiększone zainteresowanie tym właśnie stopem lekkim. Nie jest on natomiast szeroko opisany w literaturze. W związku z tym postanowiono uzupełnić stan wiedzy dotyczący wysokocyklowej trwałości zmęczeniowej duraluminium AA2519 oraz rozszerzyć go o model obliczeniowy pozwalający na prognozowanie wpływu karbu na obniżenie wysokocyklowej trwałości zmęczeniowej.

## 2. BADANIA WŁASNE

Badania własne polegały na wyznaczeniu trwałości zmęczeniowej obrobionego cieplnie stopu aluminium AA2519 przy sterowaniu siłą-naprężeniem. Podczas realizacji badań przedstawiono dwa założenia. Pierwsze z nich dotyczyło zachowania stałej wartości współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1$ , oraz wartości naprężeń był określane w sposób nominalny, bez uwzględniania współczynnika działania karbu.

---

Do realizacji badań określono trzy geometrie próbek. Pierwsze z nich były to próbki płaskie wiosełkowe gładkie (bez karbu). W dwóch pozostałych próbkach wykonano symetryczne nacięcia po obu stronach w taki sposób, aby na dnie karbu mechanicznego uzyskać promień wynoszący  $r_1 = 2$  mm oraz  $r_2 = 2$  mm.

W efekcie przeprowadzonych badań uzyskano trzy charakterystyki zmęczeniowe wysokocyklowe, oraz wyznaczono punkt przecięcia tych krzywych, który wyznacza obszar niewrażliwości na działanie karbu dla opisywanego stopu AA2519.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] DUPARC O.H., *Revue de Metallurgie*, Cahiers D'Informations Techniques 2004, 101, 353–360, doi:10.1051/metal:2004157.
- [2] BOROŃSKI D., DZIOBA I., KOTYK M., KRAMPIKOWSKA A., PALA R., *Investigation of the Fracture Process of Explosively Welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V Layered Material*. Materials, 2020, 13, 2226, doi:10.3390/ma13102226.
- [3] FISHER J.J., KRAMER L.S., *Aluminum Alloy 2519 in Military Vehicles*, Advanced Materials and Processes, 2002, 160, 43–46.
- [4] KRAMER L.S., *Stress-Corrosion Cracking Susceptibility of Various Product Forms of Aluminum Alloy 2519*, J. Mater. Eng. Perform., 2002, 11, 645–650, doi:10.1361/105994902770343647.
- [5] PAWEL S.J., *Scouting Tests to Examine Potential Corrosion of Aluminum Alloy 2519 during Fabrication*.
- [6] *The Aluminum Association Inc. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys*, The Aluminum Association, Arlington, Virginia, 2006, 28.
- [7] DAVIS J.R., *Aluminum and Aluminum Alloys*; ASM Hndbook: Materials Park, Ohio, 1993, ISBN 087170496X.
- [8] VASUDEVAN A.K., DOHERTY R.D., *Aluminum Alloys: Contemporary Research and Applications*, Academic Press Inc., New York 1989, ISBN 0-12-341831-3.
- [9] LIANG X.P., LI H.Z., HUANG L., HONG T., MA B., LIU Y., *Microstructural Evolution of 2519-T87 Aluminum Alloy Obliquely Impacted by Projectile with Velocity of 816 m/s*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2012, 22, 1270–1279, doi:10.1016/S1003-6326(11)61315-0.
- [10] GAO H., ZHANG X.M., LI H.Z., LIU Y., *Microstructure Inhomogeneities in 2519A Aluminum Plate Penetrated by an Incendiary Projectile*, Materials Science Forum, 2007, 546–549, 1049–1054, doi:10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.1049.
- [11] LIN Q., DONG W., LI Y., ZHANG H., WANG Z., *Microstructure Simulation of 2519 Aluminum Alloy in Multi-Pass Hot Compression Process*, Procedia Eng., 2014, 81, 1259–1264, doi:10.1016/j.proeng.2014.10.107.
- [12] STARKE E.A., STALEY J.T., *Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft*, Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32, 131–172, doi:10.1016/0376-0421(95)00004-6.
- [13] BOCEWICZ G., BANASZAK Z., WÓJCIK R., *Design of admissible schedules for AGV systems with constraints: a logic-algebraic approach*. In: *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, N.T. Nguyen, A. Grzech, R.J. Howlett, L.C. Jain L.C. (Eds.), Springer-Verlag, Berlin 2007, 578–587.
- [14] NOWACKI W., *Plasticity of polycrystal*, PWN, Warszawa 1987, 687–704.
- [15] ASHIMOV A., BOROVSKIY Yu., ASHIMOV A.S., *Parametrical Regulation Methods of the Market Economy Mechanisms*, Systems Science, Vol. 35, No. 1, 2005, 89–103.



---

# MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE BEHAVIOUR OF CONCRETE WITH BASALT FIBERS OR MINIBARS

Julita KRASSOWSKA

Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

**Kontakt:** j.krassowska@pb.edu.pl

**Keywords:** non-metallic reinforcement, concrete, basalt fiber, minibars basalt fracture energy

## 1. INTRODUCTION

Basalt is a natural material found in volcanic rocks derived from frozen lava with a melting point between 1500°C and 1700°C [1]. Research has shown that both CO<sub>2</sub> emission and energy consumption needed to produce basalt fibers are several times lower than in the production of conventional construction materials[2]. Previous studies showed that the effect of basalt fibers addition significantly improved the tensile strength, reduced the brittleness, and improved the toughness, deformation resistance and modulus of rupture of concrete [3]. The basalt minibars is a structural macro fiber polymer have desirable physical and mechanical properties. In the construction industry, the introduction of basalt minibars might be quite beneficial because basalt minibars is a high tensile strength polymer material that is non-corrosive, lightweight, and stiffer than other polymer fibers [4].

There is only limited information available on fracture behavior of concrete with basalt fibres or minibars which is of great importance in understanding the material behavior and in designing structures. The primary aim of this study is to analyze and compare the mechanical properties and fracture behavior of concretes reinforced with basalt fiber or minibars.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### Materials

Concrete mixtures were made with CEM I 42,5R Portland cement. The cement content was 300 kg/m<sup>3</sup>. Concrete with the ratio  $w/c = 0.5$  was selected for the test. The aggregate used was a mixture of sand with a grain size up to 2 mm (51% of aggregate) and coarse natural aggregate with a grain size up to 8 mm. Basalt fibers with an diameter of 20  $\mu\text{m}$  and 50mm long, tensile strength 1680 MPa and Young's modulus 90 GPa, were used as dispersed reinforcement. Minibars are with diameter of 0,7 mm and length 43mm with , tensile strength 1000 MPa and Young's modulus 42 GPa.

### Methods

The fracture mechanics were tested with the use of test element with dimensions of 100×100×400 mm with a U-notch-shaped primary slot 30 mm deep and 3 mm wide according to [5].

## 3. RESULTS

The increase in flexural strength was 30% due to the use of basalt fibers. The compressive strength of concrete increased by 17% thanks to the addition of basalt minibars to the mixture, while the tensile

strength increased by as much as 50%. The value of mechanical fracture parameters increased due to the application of concrete with basalt fibers or basalt minibars.

The P-CMOD diagrams obtained for the concrete with basalt fibers or minibars and the reference concrete during the three-point bending test are shown in Fig. 1.

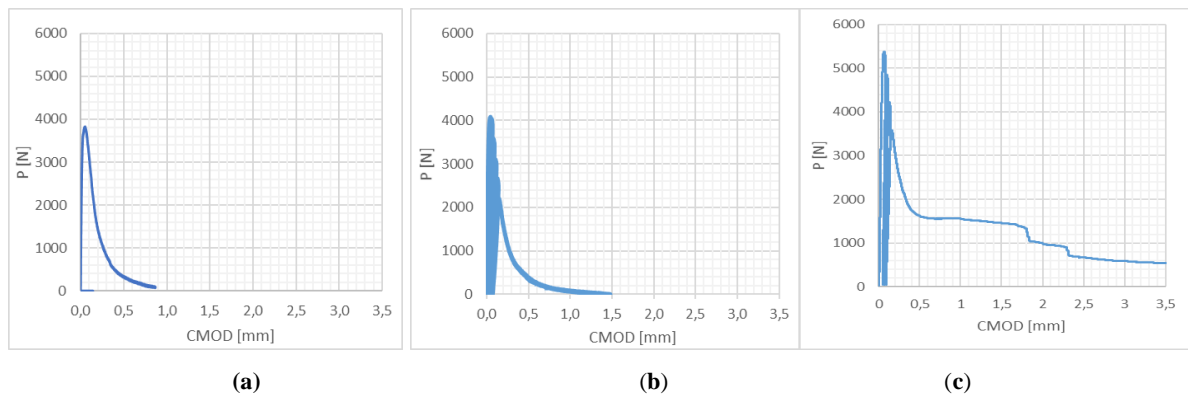


Fig. 1. Comparison of P – CMOD for the (a) reference concrete – W0, (b) concrete with basalt fibers in amount of  $5 \text{ kg/m}^3$  – WB5 and (c) concrete with basalt minibars in amount of  $5 \text{ kg/m}^3$  – MB5

The following conclusions can be drawn from the results presented. The results obtained may be useful in considering the practical applications of basalt fibers in concrete structural members.

1. The presence of chopped mini bars fibres has significant influence on compressive strength and it cause the increase in flexural strength of concrete.
2. The analysis of the P-CMOD curves show that dispersed reinforcement can significantly change the nature of the behavior of concrete members subjected to bending in both pre-cracking and post-cracking phases. The addition of basalt fiber or minibars in the tested amount of  $5 \text{ kg/m}^3$  has improved the fracture mechanics parameters.
3. The changes in fracture mechanics parameters and the modification of P-CMOD plots, recorded under load, indicate that basalt minibars can increase the concrete resistance to initiation and propagation of cracks. It should be expected that the presence of fibers will change the brittle failure mode of concrete members to more ductile one.

#### BIBLIOGRAPHY

- [1] MILITKÝ J., KOVAČIČ V., RUBNEROVÁ J., *Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers*, Engineering Fracture Mechanics, 2002, 9, 1025–1033.
- [2] ABUSHANAB A., ALNAHHAL W., *Performance of Basalt Fiber Reinforced Continuous Beams with Basalt FRP Bars*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2020, 910, 012004, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/910/1/012004>
- [3] SELIEM H.M., HIGH C.A., SELIEM H.M., EL-SAFY A.R., RIZKALLA S.H., *Use of basalt fibers for concrete structures*, in: 2015.
- [4] MUHAMMAD J.H., YOUSIF A.R., *Effect of basalt minibars on the shear strength of BFRP-reinforced high-strength concrete beams*, Case Studies in Construction Materials, 2023, 18, e02020, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02020>
- [5] JENQ YEOUSHANG, SHAH SURENDRA P., *Two Parameter Fracture Model for Concrete*, Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111, 1227–1241, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1985\)111:10\(1227\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:10(1227)).

---

# NUMERYCZNA I EKSPERYMENTALNA ANALIZA POŁĄCZENIA BETONU I PRĘTA KOMPOZYTOWEGO W TEŚCIE PULL-OUT

Tomasz SOCHA<sup>1</sup>, Arkadiusz DENISIEWICZ<sup>1</sup>, Krzysztof KULA<sup>1</sup>, Grzegorz LESIUK<sup>2</sup>,  
Wojciech BŁAŻEJEWSKI<sup>2</sup>, Szymon DUDA<sup>2</sup>, Paweł ZIELONKA<sup>2</sup>, Anna WYBRANIEC<sup>2</sup>,  
Bruno PEDROSA<sup>3</sup>, Cristiane C. LOPES<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Prof. Z. Szafrana 1, 65-246 Zielona Góra

<sup>2</sup> Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, ul. M. Smoluchowskiego 25, 50-730 Wrocław

<sup>3</sup> University of Coimbra, ISISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugalia

<sup>4</sup> Federal University of Minas Gerais, Department of Structural Engineering, Brazil

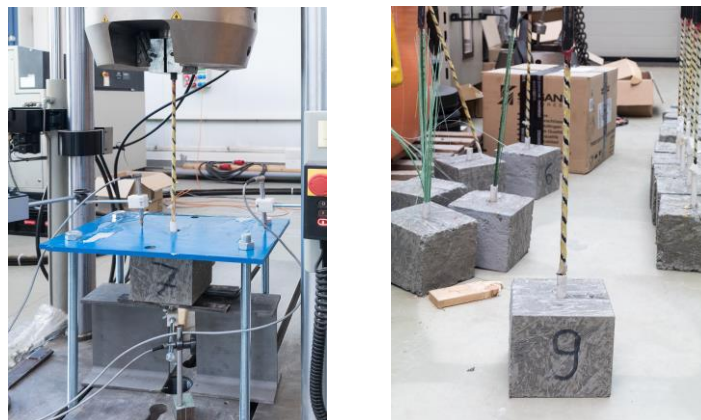
**Kontakt:** K.Kula@ib.uz.zgora.pl

**Słowa kluczowe:** CFRP, beton, MES, zbrojenie, pull-out

## 1. WPROWADZENIE

Niniejszy artykuł dotyczy oceny przyczepności prętów zbrojeniowych wykonanych z kompozytów do betonu. Coraz częściej próbuje się zastąpić tradycyjne stalowe pręty zbrojeniowe materiałami kompozytowymi, wiąże się to przede wszystkim z korozyjnością stali, ale także może w znaczący sposób wpłynąć na masę konstrukcji szczególnie w przypadku połączenia z betonami wysokowytrzymałymi [2].

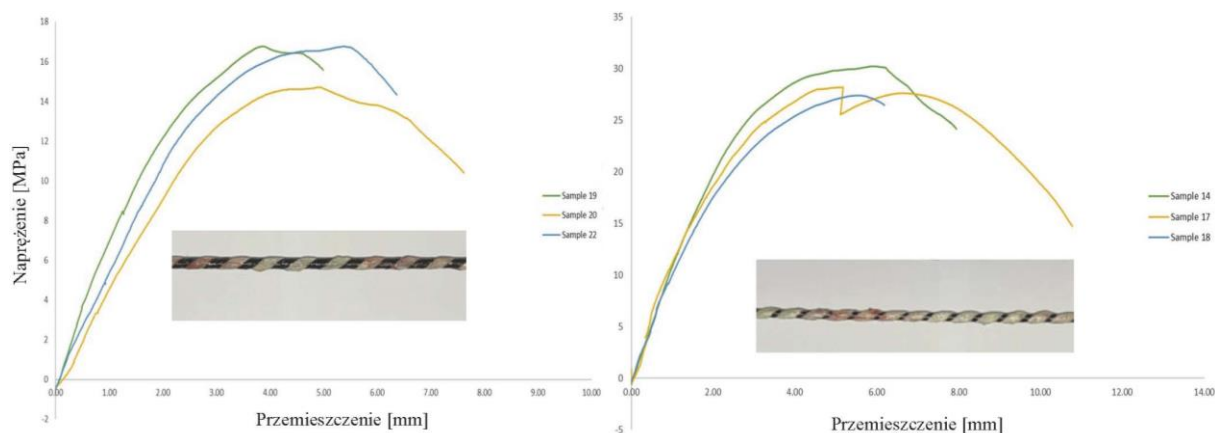
Badania doświadczalne kostek betonowych  $15 \times 15 \times 15$  cm z odpowiednio zakotwionymi (długość zakotwienia jest równa pięciu średnicom pręta) prętami kompozytowymi przeprowadzono w laboratorium Instytutu Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego. Badaniom poddano po trzy próbki z różnymi rodzajami prętów, w pracy skupiamy się na dwóch rodzajach prętów autorskich, wykonanych w Politechnice Wrocławskiej dalej nazywanych PWr\_1 (włókna szklane, bazaltowe i węglowe zastosowane jako oplot, średnica 10 mm) i PWr\_2 (włókna szklane i oplot węglowy, średnica 8 mm), na rysunku 1 przedstawiono stanowisko badawcze i przykładowe próbki. Badania posłużyły do walidacji nieliniowego modelu w systemie ABAQUS z uwzględnieniem utraty przyczepności na styku połączenie obu materiałów [1].



Rys. 1. Test pull-out i gotowe próbki

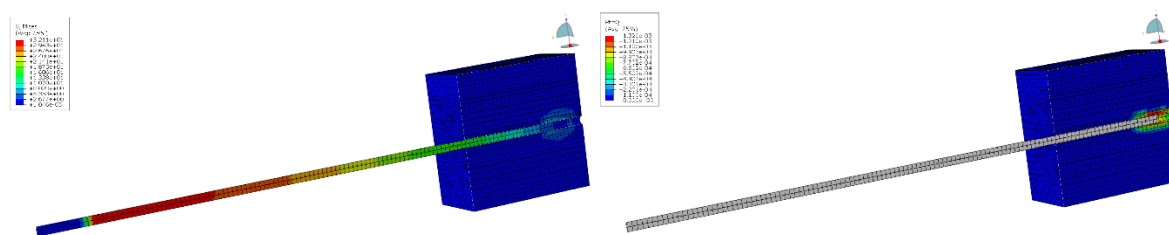
## 2. WYNIKI I WNIOSKI

Z wykresów (rys. 2) można odczytać wartość naprężenia, które spowoduje utratę kohezji na styku pręta i betonu. Wyraźnie widać, że znacznie większą wytrzymałość jest w przypadku pręta PWr\_2, tłumaczymy to jakością wykonania oplotu (czarne włókna na zdjęciach) mającego zwiększyć przyczepność do betonu. Należy dodać, że z badań wytrzymałościowych samych prętów wynikało iż pręt PWr\_1 ma większą wytrzymałość.



Rys. 2. Zależność między naprężeniem, a przemieszczeniem w teście pull-out dla dwóch rodzajów prętów kompozytowych – PWr\_1 (lewy wykres) i PWr\_2 (prawy wykres)

Wyniki eksperymentalne posłużyły do walidacji nieliniowego modelu numerycznego wykonanego w systemie ABAQUS. Do zamodelowania połączenia materiałów wykorzystano elementy kohezyjne, które pozwalają na symulację utraty ciągłości. Beton zamodelowano jako materiał nieliniowy wykorzystując model Concrete Damage Plasticity, co pozwala na obserwację rozwoju pęknięć w betonie przy wyciąganiu pręta. Wyniki numeryczne są w dobrej zgodności z doświadczalnymi. Geometria pręta na pobocznicy została uproszczona, a wytrzymałość styku jest zależna jedynie od parametrów warstwy kohezyjnej, w kolejnych testach planowane jest szersze spojrzenie na ten aspekt.



Rys. 3. Wyniki analizy numerycznej – naprężenia (lewy obraz) i odkształcenia plastyczne (prawy obraz)

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ABAQUS, *CAE User's Guide*, 2021
- [2] FAVA G., CARVELLI V., PISANI M., *Remarks on bond of GFRP rebars and concrete*, *Composites Part B: Engineering*, 2016, Vol. 93, pp. 210–220.

---

# ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ OSI KOLEJOWEJ

Patrycja LAU<sup>1,2</sup>, Piotr PACZOS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej, Plac Marii Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań

<sup>2</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Centrum Pojazdów Szynowych,  
ul. Warszawska 181, 61-055 Poznań

**Kontakt:** patrycja.lau@pit.lukasiewicz.gov.pl, piotr.paczos@put.poznan.pl

**Słowa kluczowe:** osie zestawów kołowych, wytrzymałość zmęczeniowa, badania doświadczalne, pojazdy szynowe, obliczenia MES, badania analityczne

## 1. WSTĘP

Zestawy kołowe, składające się z osi i kół, stanowią podstawowy element konstrukcyjny pojazdów szynowych. Spośród wielu zespołów są najbardziej narażone na zużycie zmęczeniowe. Ma to szczególne znaczenie w aktualnie projektowanych pojazdach, gdzie głównymi założeniami jest zaprojektowanie pojazdu o jak najniższej masie, poruszającego się z coraz to wyższymi prędkościami przejazdowymi. Biorąc pod uwagę ocenę ryzyka oraz wpływ poszczególnych podzespołów na bezpieczeństwo ruchu pojazdu szynowego, oś ma kluczowe znaczenie.

Nowoczesne osie kolejowe są podatne na uderzenia zewnętrzne podczas eksploatacji (np. tłucznia), co prowadzi do pęknięć zmęczeniowych, co za tym idzie awarii, a w skrajnych przypadkach do katastrof kolejowych. W 2009 roku we włoskim miasteczku Viareggio miała miejsce katastrofa kolejowa. Pociąg towarowy, który transportował gaz LPG, wykoleił się na wskutek pęknięcia osi pierwszego wagonu. C. Klinger, D. Bettge opisali w [1] katastrofę kolejową, która miała miejsce w Niemczech, gdzie nastąpiło wykolejenie pociągu poprzez uszkodzenie osi napędnej. Na szczęście w tym przypadku, dzięki niskiej prędkości obyło się bez ofiar. To właśnie tak tragiczne wypadki skłoniły do szerszych badań nad zmęczeniem materiałów, co przyniosło ogromne korzyści. Zmęczenie zostało uznane za proces obejmujący pękanie. Dzięki czemu obecnie mechanika pęknięć jest używana podczas kontroli pęknięć eksploatacyjnych, co przyczyniło się do znacznego spadku ilości awarii.

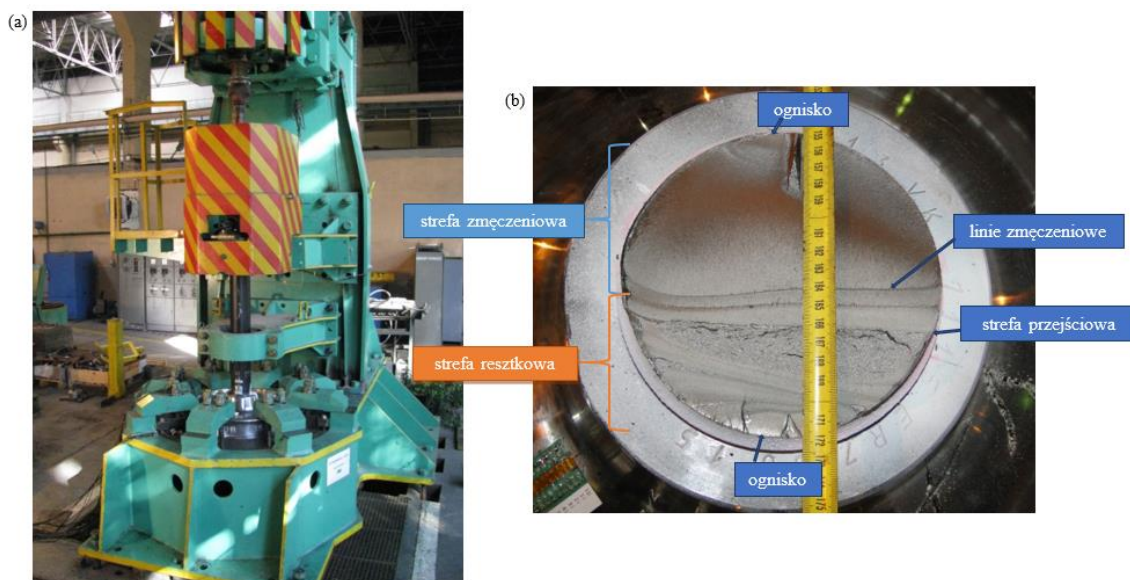
## 2. BADANIA ZMĘCZENIOWE OSI ZESTAWU KOLEJOWEGO

Badania stanowiskowe zostały wykonane w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym, w Centrum Pojazdów Szynowych na stanowisku przeznaczonym do badań wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych. Działanie maszyny zostało opisane w [2]. W celu wykonania badań do zakładu została dostarczona próbka w formie półzestawu, który składał się z osi oraz jednego wtłoczonego koła (rys. 1a). Testy obejmowały wykonanie próby zmęczeniowej w zakresie 10 milionów cykli oraz pomiary tensometryczne. Zostały wykonane także badania analityczne oraz symulacyjne MES. Otrzymane wartości naprężeń we wszystkich metodach były bardzo zbliżone. Żadna nie przekroczyła wartości dopuszczalnych (z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa równego  $S = 1.2$ ), czyli 166 [MPa].

### 3. PRZEŁOM ZMĘCZENIOWY

W czasie eksploatacji osi mogą pojawić się uszkodzenia zmęczeniowe, które można zlokalizować w przekroju za lub przed piastą, w miejscach zmiany przekroju osi lub innych miejscach na przykład w czopie lub części środkowej osi.

Podczas przeprowadzonych badań doświadczalnych osi wystąpiło pęknięcie zmęczeniowe w przekroju za piastą koła po stronie środkowej osi (rys. 1b). Po analizie powstałego przełomu, można stwierdzić, że powstał on wskutek anizotropowej budowy kryształu.



Rys. 1. Widok: (a) maszyny zmęczeniowej do badań osi i kół zestawów kołowych (b) przełomu zmęczeniowego (zasoby Łukasiewicz – PIT)

### 4. WNIOSKI

Oś pojazdu szynowego pełni niezwykle ważną funkcję jako część zestawu kołowego w pojeździe szynowym, ponieważ od jego poprawnego wykonania i zamontowania głównie zależy stabilność jazdy pociągu, co przekłada się bezpośrednio na bezpieczeństwo osób podróżujących.

Pomimo otrzymania naprężeń nieprzekraczających wartości dopuszczalnych (166MPa), wykonana oś ze stali EA1N nie wytrzymała próby. Mimo, że norma [3], określa metody sprawdzania osi podczas kwalifikacji, to niestety niektóre wady są nie do wykrycia. Dlatego istotne jest zbadanie kilku osi z danej serii na stanowisku zmęczeniowym przed wprowadzeniem obiektu do eksploatacji.

#### PODZIĘKOWANIA:

Badania zostały przeprowadzone w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy Ministerstwa Edukacji i Nauki realizowanego w latach 2021–2025 (Umowa nr DWD//5/0378/2021).

Grant of the Ministry of Science and Higher Education in Poland no 0612/SBAD/3605.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] KLINGER C., BETTGE D., *Axle fracture of an ICE3 high speed train*, Engineering Failure Analysis, 2013, 35, 66–81.
- [2] STASIAK L., *Doświadczalna determinacja charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawu kołowego pojazdów szynowych*, Rozprawy Nr 173, Politechnika Poznańska, Poznań 1986.
- [3] Norma Europejska EN 13261+A1.

---

# COMPARATIVE STUDY OF FCGR IN ADDITIVELY MANUFACTURED MATERIALS – IN625 AND IN718

Grzegorz LESIUK<sup>1</sup>, Kayode OLALEYE<sup>1</sup>, Konrad GRUBER<sup>1</sup>,  
Patrycja SZYMCZYK-ZIÓŁKOWSKA<sup>1</sup>, Nuno Miguel FERREIRA<sup>2</sup>, Szymon DZIUBA<sup>1</sup>,  
Felipe Klein FIORENTIN<sup>2</sup>, Dariusz ROZUMEK<sup>3</sup>, Marco PARENTE<sup>2</sup>, Abilio M.P. De JESUS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław

<sup>2</sup> University of Porto, Faculty of Engineering, Porto, Portugal

<sup>3</sup> Opole University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Opole

**Contact:** Grzegorz.Lesiuk@pwr.edu.pl

**Key words:** fatigue, fracture, Inconel, fatigue crack growth rate

The publication presents the results obtained during tests on samples produced by additive manufacturing method (Directed Energy Deposition) using the Inconel 625 alloy. The aim of the work was to investigate the influence of the notch orientation and the applied load expressed in mean stress effect ( $R$ -ratio) on the crack propagation rate. The paper attempts to determine the curves with three stress ratios, with a constant load amplitude ( $R = 0.1$ ;  $R = 0.5$ ;  $R = 0.65$ ), for two notch orientations. After experimental campaign fracture surfaces were examined. The main differences for different notch orientation were noticeable, mainly due to the distinct crack propagation mechanism. In the vertical notch orientation, the crack grows across multiple layers. On the other hand, the horizontal notch orientation is associated with crack growth on one layer or on the interface between two adjacent layers. In addition, the manufacturing parameters and a metallographic analysis will be presented. Also, other method of additive manufacturing – LPBF allow for manufacturing IN718 alloy as a next material for FCGR comparison. This material was heat treated in variants including (H) and excluding (A) hot isostatic pressing. FCGR tests are performed at stress ratios  $R = 0.1$  and  $R = 0.5$ . Both variants show similar FCGR and fracture modes at both stress ratios, despite a significant difference in ductility. Furthermore, A and H show similar FCGR at  $R = 0.1$  and better performance at  $R = 0.5$  compared to wrought IN718.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The publication has been prepared as a part of bilateral cooperation within the NAWA project (Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej) no. BPN/BPT/2021/1/00059 and FCT project number 2021.09574.CBM.

---

# EKSPERYMENTALNO-NUMERYCZNA ANALIZA PROCESU DESTRUKCJI RUROCIĄGÓW GAZOWYCH. CZĘŚĆ 1. ANALIZA PÓL NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ

Sebastian LIPIEC<sup>1</sup>, Ihor DZIOBA<sup>1</sup>, Grzegorz ŚWIT<sup>2</sup>, Anna ADAMCZAK-BUGNO<sup>2</sup>,  
Aleksandra KRAMPIKOWSKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Technologii Mechanicznej, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

<sup>2</sup> Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

**Kontakt:** slipiec@tu.kielce.pl

**Słowa kluczowe:** rurociągi, stal, MES, naprężenia, odkształcenia, współczynnik trójosiowości naprężeń

## 1. WPROWADZENIE

Diagnostyka stanu technicznego rurociągów gazowych ma dominujące znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa przesyłu medium oraz ekonomicznego aspektu utrzymania infrastruktury. Ważnym aspektem jest poznanie aktualnego stanu materiału, po okresie eksploatacji. Trafne określenie stanu rurociągu pozwala uniknąć kosztownych i zbędnych przestojów w transporcie gazu oraz nieuzasadnionych wymian elementów rur [1-3]. W celu określenia stanu rurociągu wykorzystane mogą być kompleksowe metody badawcze. W pracy proponuje się wdrożenie hybrydowego podejście do analizy materiału rurociągu gazowego: uzupełnienie wyników badań eksperymentalnych rezultatami symulacji numerycznych wraz z monitorowaniem stanu technicznego obiektu z wykorzystaniem rejestracji i analizy sygnałów emisji akustycznej (EA) [4,5]. Niniejsza praca skupiać się będzie na pierwszych dwóch elementach analizy: przedstawieniu wyników badań eksperymentalnych oraz omówieniu szczegółów odnoszących się do symulacji numerycznych.

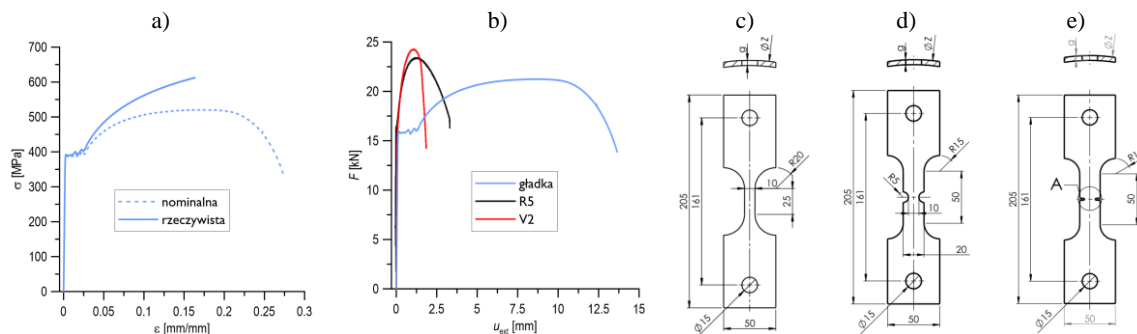
## 2. ANALIZOWANY MATERIAŁ ORAZ BADANIA EKSPERYMENTALNE

W pracy testowano próbki ze stali pobranej z infrastruktury rurociągu służącego do przesyłu gazu. W celu określenia charakterystyk wytrzymałościowych i plastyczności materiału przeprowadzono próbę jednoosiowego rozciągania w temperaturze pokojowej. W teście wykorzystano próbki gładkie zgodnie ze schematem na rysunku 1c. Testom towarzyszyła rejestracja sygnałów emisji akustycznej. Wyznaczono nominalne oraz rzeczywiste charakterystyki analizowanej stali (tabela 1). Reprezentatywne nominalne oraz rzeczywiste zależności naprężenia–odkształcenia zaprezentowano na rysunku 1a.

Tabela 1. Charakterystyki wytrzymałościowe oraz plastyczności analizowanej stali

Charakterystyki	$\sigma_{YS\_L}/\sigma_{YS\_H}$ [MPa]	$\sigma_{UTS}$ [MPa]	$E$ [GPa]	$n$	$A_5$ [%]
Nominalne	384/395	520.71	199	7.77	27.30
Rzeczywiste	390/400	613.10	200	4.70	



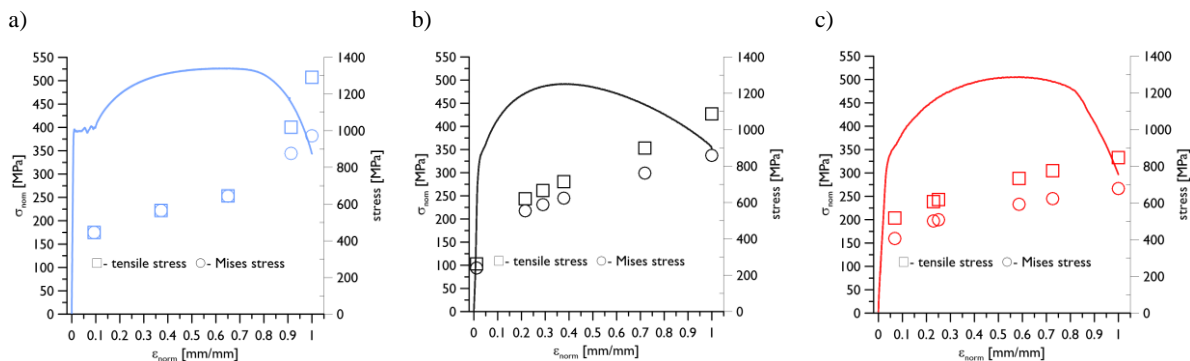


Rys. 1. Wyniki badań eksperymentalnych oraz przyjęte do analizy geometrie próbek: a) nominalna oraz rzeczywista zależność naprężenia–odkształcenia analizowanej stali, b) wykresy siła–przemieszczenie ekstensometru badanych próbek, c) gładkiej, d) z karbem R5 oraz e) z karbem V

W celu analizy rozkładów pól naprężeń oraz odkształceń w elementach charakteryzujących się zróżnicowanym poziomem trójosiowości naprężeń w programie badań eksperymentalnych wykorzystano próbki zawierające karby: o promieniu R5 (rys. 1d) oraz z ostrym typu V (rys. 1e). Schematy próbek oraz zarejestrowane podczas testów na maszynie wytrzymałościowej krzywe siła–przemieszczenie ekstensometru przedstawiono na rysunku 2.

### 3. SYMULACJE NUMERYCZNE

W kolejnym kroku analiz opracowano modele numeryczne próbek w programie Abaqus. Modele numeryczne były tożsame z geometriami próbek wykorzystywanymi w badaniach eksperymentalnych. Wyznaczono numerycznie rozkłady naprężeń występujące w analizowanych geometriach próbek (rys. 2).



Rys. 2. Wykresy w układzie nominalne naprężenia–odkształcenia z wyznaczonymi numerycznie rozkładami naprężeń: efektywnych Misesa oraz składowej naprężenia w kierunku rozciągania dla próbek: a) gładkiej, b) z karbem R5, c) z karbem V

### BIBLIOGRAFIA

- [1] CAPELLE J., GILGERT J., DMYTRAKH I., PLUVINAGE G., *Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement*, International Journal of Hydrogen Energy, 2008, Vol. 33, No. 24.
- [2] MAHAJAN D., TAN K., VENKATESH T., KILETI P., CLAYTON C.R., *Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks – A Review*, Energies, 2022, Vol. 15, 1–32.
- [3] ZVIRKO O.I., TSYRULNYK O.T., DZIOBA I., KRET N.V., LIPIEC S., *Influence of the Structural Features of Steels of Casing Pipes on their Mechanical Properties and Hydrogen Brittleness*, Materials Science, Vol. 56, No. 6, 2021, 748–754.
- [4] ŚWIT G., DZIOBA I., ADAMCZAK-BUGNO A., KRAMPIKOWSKA A., *Identification of the Fracture Process in Gas Pipeline Steel Based on the Analysis of AE Signals*, Materials, 2022, Bol. 15, No. 7.
- [5] ADAMCZAK-BUGNO A., ŚWIT G., KRAMPIKOWSKA A., PROVERBIO E., *Analysis of the Significance of Changes in the Number and Energy Parameters of Acoustic Emission Signals on the Assessment of the Strength of Fibre–Cement Boards*, Materials, 2022, Vol. 15, No. 16.

---

## NUMERICAL ANALYSES OF ADDITIVELY MANUFACTURED WEAPON COMPONENTS SUBJECTED TO HIGH VELOCITY IMPACT LOADS

Paweł ŻOCHOWSKI<sup>1</sup>, Marcin BAJKOWSKI<sup>2</sup>,  
Roman GRYGORUK<sup>2</sup>, Mariusz MAGIER<sup>2</sup>, Dariusz PYKA<sup>3</sup>,  
Mirosław BOCIAN<sup>3</sup>, Krzysztof JAMROZIAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Military Institute of Armament Technology, Prym. S. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka, Poland

<sup>2</sup> Institute of Mechanics and Printing, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Warsaw University of Technology, Narbutta 85, 02-524 Warsaw, Poland

<sup>3</sup> Department of Mechanics, Materials Science and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland

**Contact:** mariusz.magier@pw.edu.pl

**Key words:** failure, mechanical impact, numerical simulations, finite element modeling

Numerical analyses determining the response of selected additively manufactured metallic weapon components to high speed impact loads were presented in the article. The possibility of weight reduction of the analyzed components while maintaining their correct functioning in the entire weapon system was checked using the methodology based on computer simulations and the finite element method in the LS-Dyna software. In the analyses the deformations as well as stress values occurring in the interacting components were evaluated and related to the yield strength of the materials from which the components were made. Two variants of the system were analyzed, that differed in material from which the additional plate located between the slider and the rear part of the receiver (allocated in breech chamber) of the 7,62 mm AKMS rifle (Fig. 1) was made: MS300 steel and 316L steel produced using additive manufacturing. The materials significantly differed in mechanical properties – yield strength and tensile strength of MS300 steel are doubled. Results of numerical analyses shown that in both analyzed cases small plastic deformations of the additional plates were observed, which proves that the stresses occurring during the phenomenon exceeded the values of the yield strengths of both materials.

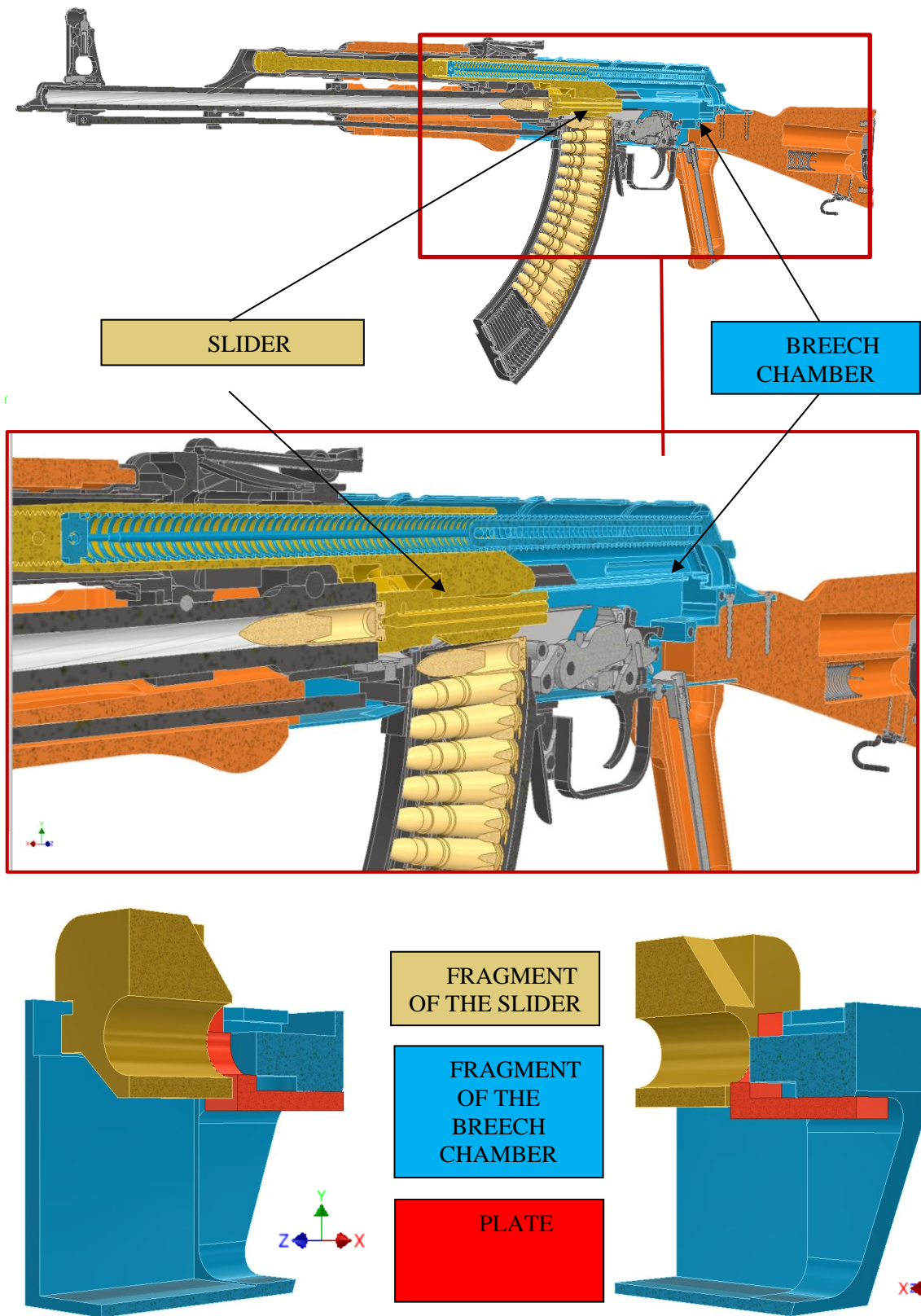


Fig. 1. Research diagram of the analyzed weapon system of the 7,62 mm AKMS rifle

---

# INFLUENCE OF POWER SPECTRAL DENSITY AVERAGING ON FATIGUE LIFE CALCULATION

Bartosz MAZUREK, Adam NIEŚLONY

Opole University of Technology, Prószkowska 76, Opole, 45-758, Poland

**Contact:** bartosz.mazurek@doktorant.po.edu.pl

**Keywords:** fatigue analysis, random loading, power spectral density (PSD), vibration measurements, PSD simplifications, fatigue life simulation

The fatigue analysis of mechanical components subjected to random loading has been continuously improved by introducing new calculation procedures and simplifications to facilitate numerical simulation. This paper focuses on the impact of power spectral density (PSD) simplifications on fatigue life simulation. Vibration measurements and simulations were conducted on a research model, including excitations such as a car towing hook, along with comparative simulations of the attached transport device. The adopted method for determining the reference PSD and conducting a comparative fatigue analysis of the selected device element for the applied changes are presented.

In computer-based finite element method (FEM) simulations, power spectral density (PSD) is utilized to assess component durability in the frequency domain. However, the shape of the PSD curve (Fig. 1) can pose challenges when incorporated into simulation programs. This research aims to investigate the possibility of simplifying the PSD using an envelope-based approach and the subsequent impact on calculation results. The goal is to determine an appropriate level of simplification that maintains calculation accuracy. The research hypothesizes that a simplified PSD with an envelope-based approach will not significantly affect component durability calculations, and there exists a level of simplification that can be achieved without compromising accuracy.

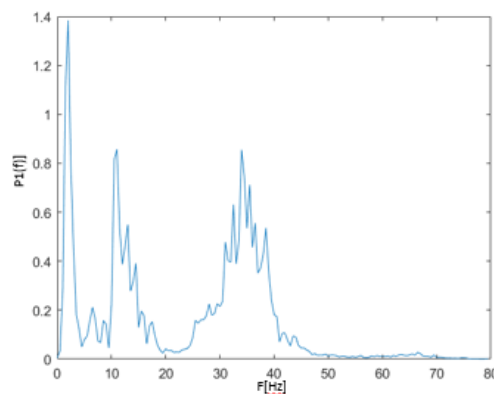


Fig. 1. Simple PSD paved road

The research methodology (Fig. 2) involves conducting measurements using accelerometers to determine vibration accelerations during road driving. The Stochastic Differential Equation (SDE) block is utilized to calculate the PSD, serving as the foundation for durability calculations. Three different PSD simplifications are applied to reduce data complexity and facilitate their usage in finite element simulations. Following the simplifications, a finite element simulation is performed, applying the load based on the simplified PSD to the selected element. This simulation allows the determination of the PSD response at the most exposed location in the model, enabling durability estimation. The impact of

the introduced simplifications on durability calculation results is analyzed for each research case, assessing the effectiveness of the adopted approach.

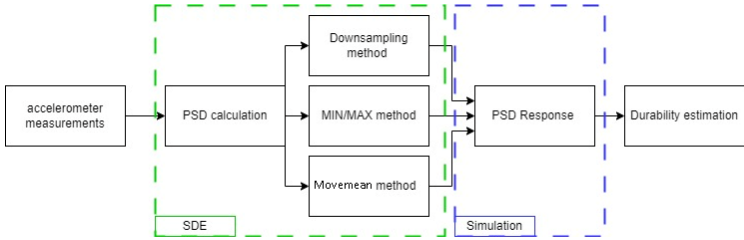


Fig. 2. Research algorithm

The conducted tests demonstrate that a simplified PSD, utilizing an appropriate envelope-based approach, does not significantly affect component life calculation results. Furthermore, it is established that a level of simplification can be achieved without compromising calculation accuracy, leading to improved computational efficiency.

REFERENCES

[1] NIESŁONY A., *Comparison of some selected multiaxial fatigue failure criteria dedicated for spectral method*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 48, 233–254.

[2] BISHOP N., SHERRATT F., *Finite element based fatigue calculations*, NAFEMS, 2000.

[3] CHU C.-C., *Multiaxial fatigue life prediction method in the ground vehicle industry*, International Journal of Fatigue, 1997, 19, 325–330.

[4] DU J. et al., *A novel hybrid frequency-time domain method for the fatigue damage assessment of offshore structures*, Ocean Engineering, 2015, 98, 57–65.

[5] NIESŁONY A., MACHA E., *Spectral method in multiaxial random fatigue*, Springer Science & Business Media, 2007.

[6] BRACCESI C. et al., *Random multiaxial fatigue: A comparative analysis among selected frequency and time domain fatigue evaluation methods*, International Journal of Fatigue, 2015, 74, 107–118.

---

## FATIGUE AND FRACTURE PROPERTIES OF RIGID PUR ELASTOMERS

Krzysztof JUNIK<sup>1</sup>, Daniel MEDYŃSKI<sup>2</sup>, Wojciech MACEK<sup>3</sup>, Kayode OLALEYE<sup>4</sup>,  
Szymon DUDA<sup>4</sup>, Grzegorz LESIUK<sup>4</sup>, Krzysztof JAMROZIAK<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Strongflex.pl Sp. Z o.o. company, R&D centre, Wrocław, Poland

<sup>2</sup> Collegium Witelona, ul. Sejmowa 5a, 59-220 Legnica

<sup>3</sup> Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland

<sup>4</sup> Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław

**Contact:** daniel.medynski@collegiumwitelona.pl

**Key words:** Fatigue, Fracture, polyurethane, elastomers

Polyurethane materials are an excellent example of materials that can successfully replace rubber in automotive components. In this paper, two material configurations of so-called polyurethane rubbers – elastomers with different hardnesses – are presented for testing. The effect of hardness on fatigue properties and crack growth rate was studied. Fatigue tests were conducted on an MTS Bionix testing machine using specially designed Diabolo type specimens. A significant effect of hardness on the fatigue curves was shown for controlled displacement tests. A series of Double Edge Notched Tension Specimen (DENT) and Pure Shear (PS) tests were performed to characterize the propensity to fracture. Again, it was shown that an increase in hardness resulted in an increase in the critical energy required to initiate the fracture process. The experimental testing program was supported by numerical calculations in the Abaqus environment using the hyperelastic Ogden model.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The publication has been prepared as a part of the Support Programme of the Partnership between Higher Education and Science and Business Activity Sector financed by City of Wrocław.

---

# STOCHASTIC FATIGUE STRENGTH MODELLING OF A DOUBLE-SHEAR RIVETED CONNECTION

António M. MOURÃO<sup>1</sup>, José A.F.O. CORREIA<sup>1</sup>, Cláudio HORAS<sup>1</sup>,  
Túlio BITTENCOURT<sup>2</sup>, Rui CALÇADA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CONSTRUCT & INEGI, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal

<sup>2</sup> Polytechnic School, University of São Paulo, Brasil

**Contact:** amourao@fe.up.pt

**Keywords:** fatigue, SFEM, riveted connection, bridge

Fatigue is a leading cause of failure in metallic bridges, more so in old riveted bridges. The variable nature associated with the phenomenon of fatigue, particularly for riveted connections, renders estimating the fatigue life of these structural components challenging. The present research puts forward a stochastic modelling approach to account for the variability in the material, clamping stresses and friction coefficient in the final fatigue resistance curves.

The stochastic finite element modelling methodology is based on a Markov–Chain–Monte Carlo simulation, where the resulting numerical fatigue curves are compared to the fatigue curves acquired experimentally for double shear riveted connections for the St37 material as well as other datasets gathered from literature. The results demonstrate that the stochastic finite element modelling approach is capable of accurately predicting the fatigue life of double shear riveted connections.

The findings in this study have implications for the fatigue life assessment of old riveted bridges. The stochastic finite element modelling approach can be used to predict the fatigue life of old riveted bridges with greater accuracy than traditional methods. Hence, information can be used to prioritize maintenance and to ensure the safe operation of old riveted bridges.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the base funding – UIDB/04708/2020 and the programmatic funding – UIDP/04708/2020 of the CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC). António Mourão would like to thank the Ph.D. research grant (PD/BD/150306/2019) awarded by national funds (PIDDAC) through the Portuguese Science Foundation (FCT/MCTES).

---

# BALLISTIC AND FRACTURE PERFORMANCE OF SOLID DCPD WITH VARYING THICKNESSES SUBJECTED TO AN IMPACT LOAD

Kayode OLALEYE<sup>1</sup>, Dariusz PYKA<sup>1</sup>, Mirosław BOCIAN<sup>1</sup>,  
Adam KURZAWA<sup>2</sup>, Krzysztof JAMROZIAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanics, Materials and Biomedical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

<sup>2</sup> Department of Lightweight Elements Engineering, Foundry and Automation, Wrocław University of Science and Technology, Łukasiewicza 7-9 str., 50-371 Wrocław, Poland

**Contact:** kayode.olaleye@pwr.edu.pl

**Key words:** Behind Armor Blunt Trauma, DCPD, fracture, deformed bullet, Abaqus

## 1. INTRODUCTION

In general, excellent body armor stops small arms ammunitions bullets while simultaneously dispersing the kinetic energy and velocity delivered by the shooting. The truth is that impact energy and projectile momentum should dissipate in the elements of the body shield before they react with the body and cause serious injury. By doing this, the impact location's energy density is reduced, and less impact energy can induce deformation behind the armor by the shield used. The kinetic energy and momentum that the projectile conveyed when it impacted the armor and were transformed into dynamic body displacement was what caused this deformation [1]. Even if there is no total perforation, the area of the body directly behind the impacted component of the armor receives a blow as a result of the armor displacement. This blow is frequently referred to as a "Behind Armor Blunt Trauma" (BABT) or a "Behind Helmet Blunt Trauma" (BHBT) when the thorax is implicated [2]. BABT can result in minor or serious injuries that may be fatal when internal organs are damaged or destroyed. The maximum BABT cannot be greater than 44 mm, according to the standard [3]. The BABT investigations are research of the dynamic response of complex multi-material systems when deformed and damaged [4, 5]. They involve a projectile impact, protection, and backing material. The literature analysis shows that the potential possibilities of increasing the impact energy dissipation capacity of the ballistic shield also result from the type of matrix [5, 6].

This study concentrated on the impact resistance and fracture behavior of dicyclopentadiene (DCPD) resin matrix under the impact of a 9 mm FMJ bullet travelling at 350 m/s. The behavior of the bullet's core and jacket was modelled using the Johnson-Cook constitutive model, which was the first model to take strain hardening, strain rate effect, and metal thermal softening into account. The DCPD underwent a quasi-static test to obtain the parameters required for the constitutive model. The model was numerically simulated using ABAQUS/explicit code, and the fracture performance was quantified.

## 2. RESULTS

In the experimental studies, the main attention was focused on the absorption capabilities of the matrix. The authors emphasize that the DCPD matrix used improves the ability to absorb impact energy of light ballistic shields [7]. Selected results from the quasi-static DCPD test for the identification of material constants of the matrix of the constitutive model are presented below.



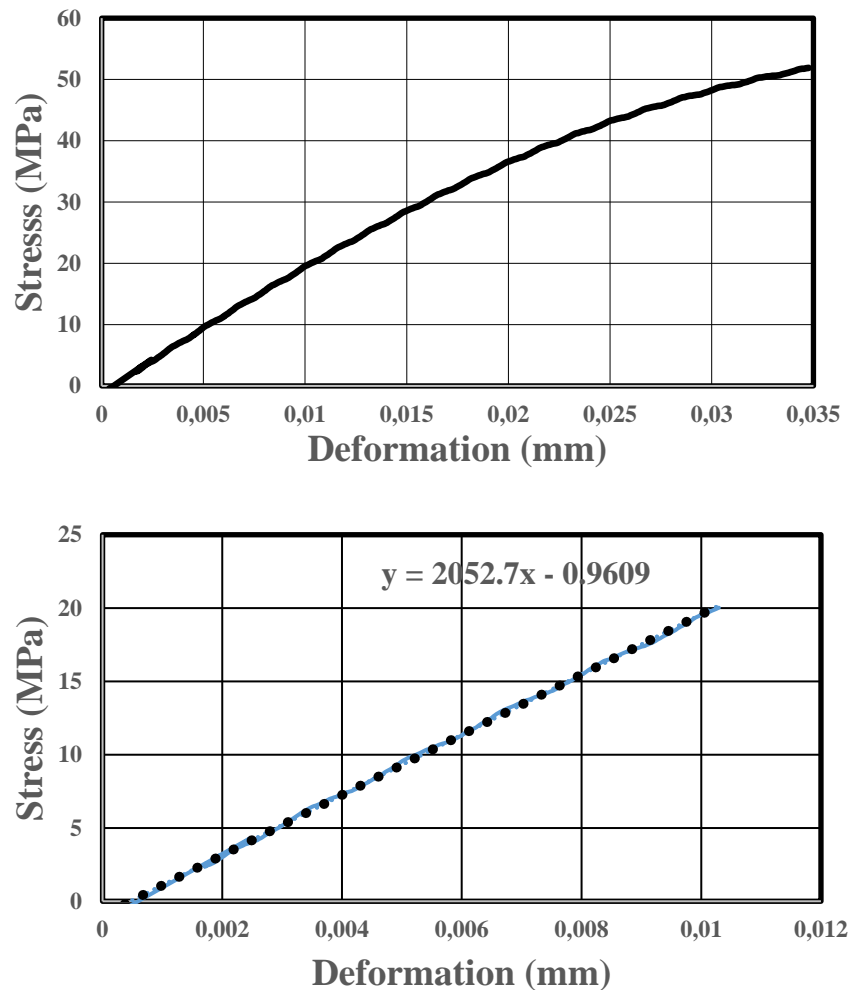


Fig. 1. Quasi-static test results of the tested DCPD

#### REFERENCES

- [1] GOTTS PL. *The transfer of momentum: a suitable measurement for behind armour blunt trauma?*, Proceedings of Personal Armour Systems Symposium (PASS '98), Colchester, UK, 1998, pp. 423–432.
- [2] CANNON L., *Behind armour blunt trauma-an emerging problem*, BMJ Mil Health, 2001, 147, 87–96.
- [3] NIJ Standard-0101.06. *Ballistic Resistance of Body Armor*, U.S. Department of Justice, July 2008.
- [4] CARR D.J., HORSFALL I., MALBON C., *Is behind armour blunt trauma a real threat to users of body armour?, A systematic review*, BMJ Mil Health, 2016,162, 8–11.
- [5] JAMROZIAK K., PYKA D., PACH J., BOCIAN M., KURZAWA A., KUROWSKI J., *Dissipative Properties of Non-Newtonian Fluid under Impact Load*, Eng. Mech., 2018, 321–323.
- [6] BANDARU A.K., CHAVAN V.V., AHMAD S., ALAGIRUSAMY R., BHATNAGAR N., *Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors*, International Journal of Impact Engineering, 2016, 89, 1–13.
- [7] BOCIAN M., PACH J., JAMROZIAK K., KOSOBUDZKI M., POLAK S., PYKA D., KURZAWA A., KUROWSKI J., *Experimental and numerical analysis of aramid fiber laminates with DCPD resin matrix subjected to impact tests*, MATEC Web Conf., 2017, 112, 04013.

---

# WPLYW UKIERUNKOWANIA WTRĄCEŃ NA ODPORNOŚCI NA PĘKANIE ORAZ ROZKŁADY NAPRĘŻEŃ PRZED FRONTEM PĘKNIĘCIA W ZMIENNYCH TEMPERATURACH TESTU

Grzegorz ŚWIT<sup>1</sup>, Ihor DZIOBA<sup>2</sup>, Robert PAŁA<sup>2</sup>,  
Anna ADAMCZAK-BUGNO<sup>1</sup>, Aleksandra KRAMPIKOWSKA<sup>1</sup>

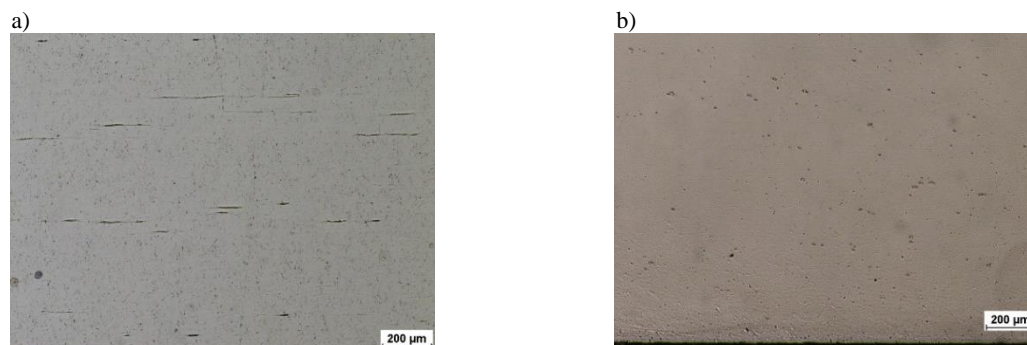
<sup>1</sup> Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce;  
gswit@tu.kielce.pl (G.S.); aadamczak@tu.kielce.pl (A.A-B); akramp@tu.kielce.pl (A.K.)

<sup>2</sup> Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce;  
pkmid@tu.kielce.pl (I.D.)

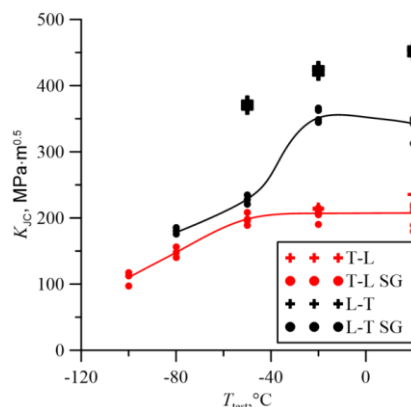
**Kontakt:** rpala@tu.kielce.pl

**Słowa kluczowe:** odporność na pękanie, wtrącenia niemetaliczne, emisja akustyczna

Praca zawiera wyniki badań wpływu kierunku ułożenia wtrąceń w stali ferrytyczno-perlitycznej na charakterystyki odporność na pękanie w zakresie temperatur powodujących zmianę mechanizmu pękania od ciągliwego do quasi kruchego (rys. 1, 2) [1, 2]. Do określenia charakterystycznych momentów w historii obciążenia, odpowiadających pękaniu pasmowo ułożonych wtrąceń niemetalicznych, wykorzystano analizy sygnałów emisji akustycznej [3]. W celu zwiększenia dominacji płaskiego stanu odkształcenia przed frontem pęknięcia nacięto rowki boczne w płaszczyźnie propagacji pęknięcia.



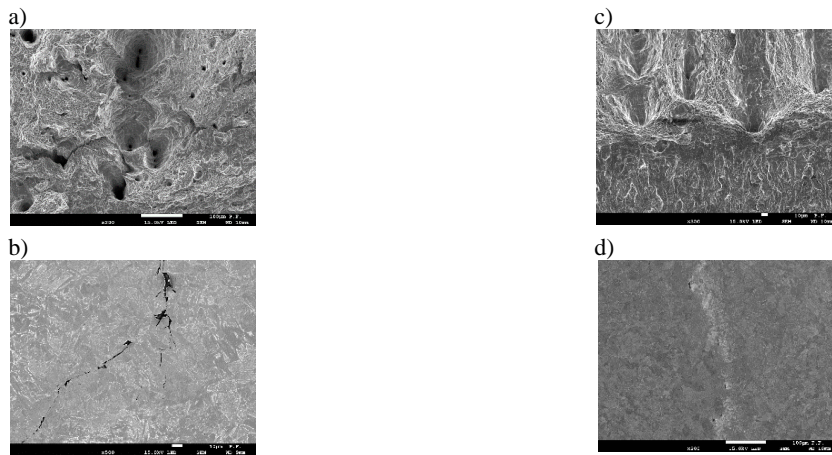
Rys. 1. Mikrostruktura stali ferrytyczno-perlitycznej z widocznymi wtrąceniami dla dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków walcowania: a) T-L, b) L-T



Rys. 2. Wpływ ukierunkowania wtrąceń na wartość odporności na pękanie w zależności od temperatury badań dla kierunku T-L i L-T

---

Analizy sygnałów emisji akustycznej umożliwiają klasyfikację grup sygnałów odpowiadających różnym mechanizmom pęknięcia. Wyznaczone za pomocą MES rozkłady naprężeń przed frontem pęknięcia pozwalają określić krytyczny stan naprężeń powodujący pęknięcie wtrąceń dla analizowanych kierunków pobierania próbek.



Rys. 3. Przełom próbki SENB dla  $T_{test} = 20^{\circ}\text{C}$ : a – kierunek L-T, c – kierunek T-L; zgląd z przełomu wykonany w płaszczyźnie normalnej do płaszczyzny rozwoju pęknięcia głównego dla  $T_{test} = -80^{\circ}\text{C}$  i kierunku: b – kierunek L-T, d – kierunek T-L

Powierzchnie przełomów poddano obserwacji na SEM (rys. 3). Wykazano, że kierunek ułożenie wtrąceń niemetalicznych w znaczącym stopniu wpływa na poziom odporności na pęknięcie w obszarze pęknięcia ciągliwego. Wraz z obniżaniem temperatury testu różnice w odporności na pęknięcie maleją.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] ASTM E1820-09 2011. *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness Annual book of ASTM standards*, 1070–1118.
- [2] PAŁA R., LIPIEC S., DZIOBA I., *Influence of the steel rolling direction on the mechanical properties and distribution of the local stress in front crack*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 46, 012064, 1–5.
- [3] ŚWIT G., DZIOBA I., ADAMCZAK-BUGNO A., KRAMPIKOWSKA A., *Identification of the Fracture Process in Gas Pipeline Steel Based on the Analysis of AE Signals*, Materials, 2022, 15, 2659.
- [4] Abaqus 6.12 Getting Started with Abaqus Interactive Edition.

---

# CONSTITUTIVE DAMAGE MODELLING OF A 3D PC AND ABS BLEND

Robert PANOWICZ, Marcin KONARZEWSKI, Adam JESCHKE

Faculty of Mechanical Engineering, Military University of Technology, 2, Gen. Kaliskiego Str., 00-908 Warsaw, Poland

**Contact:** robert.panowicz@wat.edu.pl

**Key words:** 3D printing, PC, ABS, fracture

Blends of PC (polycarbonate) and ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) exhibit notable ductility and increased fracture resistance, along with reduced thermal shrinkage during manufacturing when compared to pure ABS. These properties make the material suitable for a wide range of part production methods, including traditional techniques like injection moulding and machining, as well as emerging methods like 3D printing.

In the pursuit of developing new solutions, computational mechanics methods have gained importance. These methods require appropriate constitutive relationships to accurately represent the material's behaviour under complex loading conditions. These relationships should describe how the material behaves under specific conditions such as strain, temperature, and strain rate, which align with the anticipated usage of the component. Particularly, when the material undergoes significant deformation, such as the appearance of cracks or voids, the process of material failure evolution is greatly influenced by stress triaxiality.

Taking these factors into account, our investigation focuses on understanding the fracture process of PC and ABS blends under different triaxiality values. To achieve this, we fabricated and tested eight types of specimens with varying triaxiality using 3D printing techniques (refer to Figures 1 and 2). Based on these tests, stress-strain curves were determined. Subsequently, response surface methodology (RSM) was employed to determine the parameters of the constitutive model, enabling us to elucidate the material failure process under the assumed loading conditions.

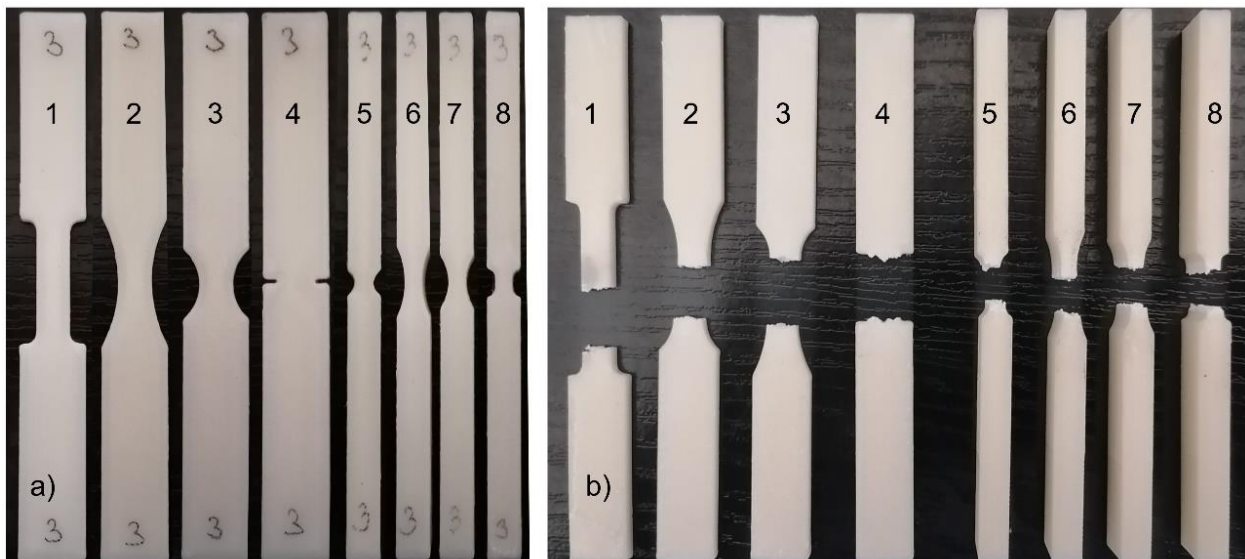


Fig. 1. Specimens (a) before and (b) after experiments

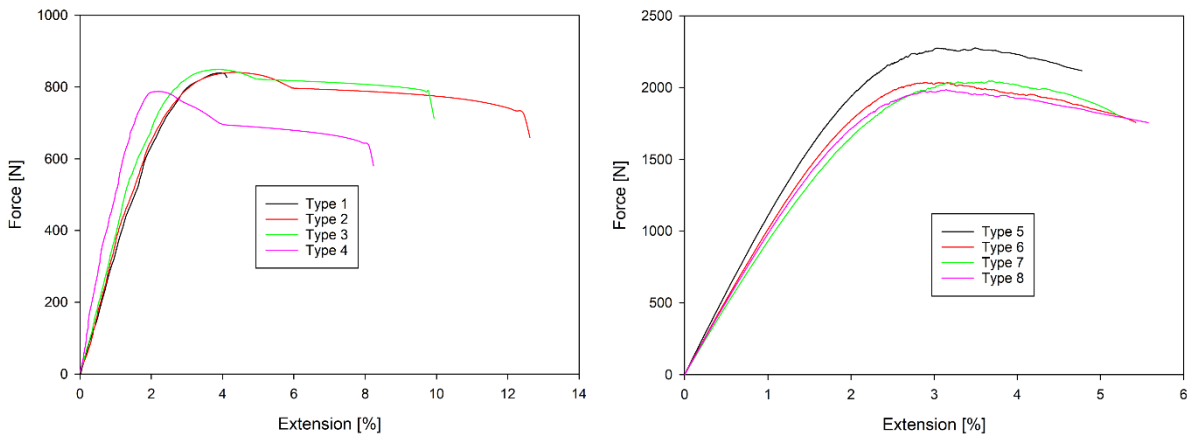


Fig. 2. Force – extension curves of different specimens

---

## **HYBRID SIMULATION OF DYNAMIC LOADING ON FLOATING LAMINATES: COMBINING FEM AND SPH METHODS**

Ana PAVLOVIC

University of Bologna, Department of Industrial Engineering, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy

**Contact:** ana.pavlovic@unibo.it

**Keywords:** hydroelastic slamming, maritime structures, composite materials

The study of dynamic events such as impact and hydroelastic slamming is of great importance in determining the structural integrity of naval or maritime structures, particularly those made of composite materials. This topic has been investigated by numerous researchers using analytical, experimental, and numerical approaches. In this study, we propose using a hybrid numerical model combining Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) and Finite Element Method (FEM) to investigate the impact of external objects on floating laminates. The results show a good agreement with the available experimental data regarding the impact dynamic and some limitations in the damage determination.

---

# FATIGUE MODELLING OF LOW-CARBON STEEL BOLT HOLE: FROM MATERIAL TO STRUCTURAL DETAIL

Bruno PEDROSA

University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal

**Contact:** bruno.pedrosa@uc.pt

**Keywords:** fatigue, low-carbon steel, bolt hole, global and local approaches

Construction of metallic bridges started to spread throughout the world during the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> century and a significant number of these structures are still in service. The most common evidence of damages are the presence of corroded metallic elements and cracks in structural details due to the fatigue phenomenon [1]–[3]. In fact, recent investigations showed that fatigue is the most frequent cause of damage in steel bridges [4], [5]. Furthermore, many cases were found in which fatigue cracks were detected in connections [6]. Fatigue behavior of bolted or riveted connections is dependent on the stress level that their components are subjected. Fatigue cracks emerging from the connecting plate are more frequent because geometric discontinuities lead to high stress concentrations. A peak of stresses is found at the edges of the bolt hole. This high level of stresses can originate a crack which will propagate perpendicular to the load direction.

The common procedure to assess the fatigue life on civil engineering structures is based on global methods using nominal stresses and linear damage accumulation. For example, fatigue design of steel structures using EC3-1-9 [7], AASHTO [8] and JSSC [9] rely on fatigue strength S-N curves assigned for a catalogue of constructional details. Its application is simple, however there are several limitations related to the accuracy to address complex geometries, stress computation and material properties. Considering the evolution of technological and computation efficiency in the last decades, local approaches for fatigue assessment have been considered as a reliable alternative in which finite element method is the basis to obtain local fatigue damage parameters used to derive fatigue life. Furthermore, these local approaches allow to establish a clear distinction between initiation and propagation phases which is not possible if global approaches are used.

Considering the local nature of fatigue phenomenon, material characterization is essential for any structural integrity study. Two structural steels (S235 and S355) were selected aiming to understand the relation between metallographic properties (microstructural composition, grain and crystallite sizes, dislocation density and chemical composition) and mechanical performance (hardness, monotonic, fatigue and crack growth behavior). Standard recommendations based on DNV-RP-C-208 [10] for cyclic and fatigue behavior and BS 7910 [11] for fatigue crack growth were compared with statistical analysis of experimental results. Fatigue behavior was assessed based on three distinct damage parameters: strain (Coffin [12] – Manson [13]–Basquin [14]), SWT [15] and strain energy density (Huffman model [16]).

Fatigue tests were conducted on bolt hole details aiming to evaluate fatigue crack initiation and propagation phases. Experimental results are compared with similar research campaigns found in literature to assess the impact of three important parameters on the fatigue life: application of corrosion protection methods, methodology used to execute the hole in the plate and selection of metallic material.

Local approaches to fatigue were applied considering initiation and propagation phases. Damage parameters were assessed by means of numerical computations using mean and characteristic values of stabilized cyclic stress-strain curve. Single side and double side crack approaches were studied by means of experimental and numerical approaches. It showed that if a crack emerges in both sides of the hole, 30% smaller fatigue life is obtained. Numerical computation of fatigue crack propagation phase led to a number of cycles within the mean and characteristic values found experimentally. Huffman damage

---

model [16] based on strain energy density parameter was the most efficient local model to predict the fatigue life of this bolt hole detail.

#### REFERENCES

- [1] AKESSON B., *Fatigue Life of Riveted Steel Bridges*, 1st ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [2] GEISSLER K., *Assessment of Old Steel Bridges*, Structural Engineering International, 2002, Vol. 12, No. 4, pp. 258–263.
- [3] LARSSON T., *Fatigue assessment of riveted bridges*, PhD Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Lulea University of Technology, 2009.
- [4] OEHME P., *Schäden an Stahltragwerken – eine Analyse, Damage Analysis of Steel Structures*, in: *IABSE Proceedings P-139/89*, 1989.
- [5] IMAM B. and CHRYSANTHOPOULOS M., *A review of metallic bridge failure statistics*, in: *IABMAS*, 2010.
- [6] EU FP6, *Sustainable Bridges – Background document D4.6: Improved assessment methods for static and fatigue resistance of old steel railway bridges*, Goteborg 2007.
- [7] European Committee for Standardisation, *EN 1993-1-9: Eurocode 3, Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue*, Brussels 2010, pp. 1–45.
- [8] AASHTO, *AASHTO LRFD: bridge design specification*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [9] JSSC, *Fatigue Design Recommendations For Steel Structures*, Japanese Society of Steel Construction, 1995.
- [10] Det Norske Veritas, DNV-RP-C208. *Determination of Structural Capacity by Non-linear FE analysis Methods*, 2013.
- [11] BSI Standards Publication. *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2015, p. BS 7910:2013.
- [12] COFFIN L., *A study of the effects of the cyclic thermal stresses on a ductile metal*, Translations of the ASME, 1954, Vol. 76, pp. 931–950.
- [13] MANSON S., *Behaviour of materials under conditions of thermal stress*, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1954.
- [14] BASQUIN O., *The Exponential Law of Endurance Tests*, American Society for Testing and Materials Proceedings, 1910, Vol. 10, pp. 625–630.
- [15] SMITH K.N., WATSON P., and TOPPER T., *A stress–strain function for the fatigue of metals (stress–strain function for metal fatigue including mean stress effect)*, Journal of Materials, 1970, Vol. 5, No. 4, pp. 767–778.
- [16] HUFFMAN P., *A strain energy based damage model for fatigue crack initiation and growth*, International Journal of Fatigue, 2016, Vol. 88, pp. 197–204.



---

# PROBABILISTIC MODELING OF FATIGUE IN A STRUCTURAL COMPONENT USING A MULTISCALE MATERIAL-DETAIL APPROACH

Carlos REBELO<sup>1,3</sup>, Bruno PEDROSA<sup>2,3</sup>, José CORREIA<sup>3</sup>, Grzegorz LESIUK<sup>4</sup>

<sup>1</sup> University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Vila Real, Portugal

<sup>2</sup> University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal

<sup>3</sup> INEGI & CONSTRUCT, Faculty of Engineering, University of Porto, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>4</sup> Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland

**Contact:** cfcrebelo@fe.up.pt

**Key words:** fatigue, material characterization, probabilistic analysis, numerical approach

The S235 JR steel has attracted increasing interest in the field of structural rehabilitation, and its study is relevant due to its application as an equivalent material in old metallic structures in operation. The main objective of the present study was to analyze three local models (crack initiation): CMB (Coffin–Manson–Basquin) model [1]–[3], SWT (Smith–Watson–Topper) model [4] and SED-Huffman (strain energy density) model [5]. For this purpose, an experimental campaign was carried out on a detail (plate with center hole) of the mentioned material. Therefore, after applying the numerical models, it was possible to realize which best fitted the experimental results.

The first steps in the development of this work were the metallographic and mechanical characterization of the material. The metallographic characterization allowed to determine the grain size and to analyze the microstructure of the steel under study. These two parameters are directly related to the cyclic behavior of the material, so their study is relevant. In addition, an XRD (X-ray diffraction) analysis was performed [6]. This analysis allowed the determination of the dislocation values of the crystal-line structure, fundamental for the application of the SED-Huffman model.

The mechanical characterization of the material made it possible to evaluate the hardness, cyclic behavior, initiation period and propagation period. The hardness value of the steel was determined and with this it was possible to assess the impact of the chemical composition on this parameter. The cyclic behavior and the initiation period were characterized according to the results obtained by Carvalho [7]. The author performed the fatigue tests according to ASTM E606 standards [8]. The Ramberg-Osgood curve constants were determined by fitting the experimental results [9]. The fatigue constants were also obtained by fitting the CMB and SWT models. On the other hand, in the case of the SED-Huffman model, the parameters were also obtained by fitting to the experimental results, but took into account the variation of the dislocation value. The aim was to determine a critical dislocation value that best fitted the experimental results.

The propagation period was characterized according to the Paris law. An experimental campaign was carried out to determine the crack propagation rate according to ASTM E647 standards [10]. This was carried out for a stress ratio  $R = 0.05$  and  $R = 0.25$ . The propagation constants were obtained by fitting the experimental results according to Paris law [11].

For the cyclical behavior, initiation period and propagation period, a probabilistic analysis was performed. This allowed to determine the characteristic values of the material for the different parameters.

As mentioned, the case study was a plate with a center hole. An experimental campaign was carried out in high cycle regime, for a stress ratio  $R = 0.1$ . By adjusting the results obtained, the average and characteristic fatigue curves of the detail were determined. These were compared to the curve proposed by the Eurocode [12]. It was concluded that this curve does not fit the results obtained, since it is more suitable for a propagation regime and is not sensitive to the type of material.

---

With the metallographic and mechanical characterizations completed and the experimental results obtained, it was possible to proceed to the numerical analysis of the detail. As mentioned, this had as main objective the application of three fatigue initiation models (local). In these models, the local strain and stress values obtained in Abaqus were applied. All the description of the constructed model is present in the document. The number of cycles corresponding to the initiation period was determined for each approach. For the propagation period, this was determined according to the Paris law. The curve that allows the calculation of the stress intensity factor for any stress value was determined. The number of cycles corresponding to the propagation period was calculated by integrating the Paris equation.

Finally, the initiation and propagation periods were added together and compared with experimental results. It was found that the initiation model that provided the best fit to the experimental results was the SED-Huffman model. It was also concluded that a local approach, considering fatigue characteristic values, is more appropriate than the curve proposed by the Eurocode.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the following grants: base funding – UIDB/04708/2020 and programmatic funding – UIDP/04708/2020 of the CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC); Ph.D. scholarship (SFRH/BD/145037/2019), awarded to Bruno Pedrosa, by national funds (PIDDAC) through the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT/MCTES); and, individual project grant (2020.03856.CEECIND), awarded to José A.F.O. Correia, by national funds (PIDDAC) through the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT/MCTES). This work was also financially supported by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC), under the MIT Portugal Program under the project MIT-EXPL/SOE/0054/2021. Additionally, this work is also a result of the Agenda “NEXUS: Innovation Pact Digital and Green Transition – Transports, Logistics and Mobility”, no. C645112083-00000059, investment project no. 53, financed by the Recovery and Resilience Plan (PRR) and by European Union – NextGeneration EU.

#### REFERENCES

- [1] MANSON S.S., *Behaviour of materials under conditions of thermal stress*, NACA TN-2933, National Advisory Committee for Aeronautics, USA, 1954.
- [2] COFFIN L.F., *A study of the effects of the cyclic thermal stresses on a ductile metal*, Translations of the ASME, 1954, Vol. 76, pp. 931–950.
- [3] BASQUIN O.H., *The exponential law of endurance tests*, Proceedings of the American Society for Testing and Materials, 1910, Vol. 10, pp. 625–630.
- [4] SMITH K., WATSON P., and TOPPER T., *A Stress–Strain Function for the Fatigue of Metals*, Journal of Materials, 1970, Vol. 5, pp. 767–778.
- [5] HUFFMAN P.J., *A strain energy based damage model for fatigue crack initiation and growth*, Int. J. Fatigue, Jul. 2016, Vol. 88, pp. 197–204.
- [6] CALLISTER J.W.D. and RETHWISCH D.G., *Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução*, 9th ed., Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro 2018.
- [7] CARVALHO D.F., *Comportamento à fadiga de aços estruturais*, Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real 2014.
- [8] ASTM E606. *Standard Practice for Strain Controlled Fatigue Testing*, Annual Book of ASTM Standards, Part 10, 1998.
- [9] RAMBERG W. and OSGOOD W., *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*, NACA Technical Note 902, 1943.
- [10] ASTM E647. *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates*. In: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1999.
- [11] PARIS P.C., GOMEZ M.P., and ANDERSON W.E., *A rational analytic theory of fatigue*, The Trend in Engineering, 1961, pp. 9–14, 1961.
- [12] CEN, *EN 1993-1-9: Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue*. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

---

# BADANIA EKSPERYMENTALNE WZROSTU PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH STALI BAINITYCZNEJ

Dariusz ROZUMEK<sup>1</sup>, Grzegorz LESIUK<sup>2</sup>, Aleksandra KRÓLICKA<sup>2</sup>,  
Roman KUZIĄK<sup>3</sup>, Krzysztof RADWAŃSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn,  
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

<sup>2</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej,  
ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

<sup>3</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny w Gliwicach, , ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

**Kontakt:** d.rozumek@po.edu.pl

**Słowa kluczowe:** zginanie ze skręcaniem, karb, wzrost pęknięć zmęczeniowych, stal

## 1. WPROWADZENIE

Stale bainityczne znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie, kolejnictwie czy części do budowy maszyn. Struktura składająca się z ferrytu bainitycznego wraz z austenitem szczątkowym w sposób bezpośredni przyczynia się do wzrostu właściwości wytrzymałościowych oraz plastycznym. Pod wpływem obciążenia obserwuje się wyraźne różnice w pękaniu pomiędzy stalą bainityczną a ferrytyczną, co przypisać można obecności austenitu szczątkowego o morfologii warstwowej i blokowej

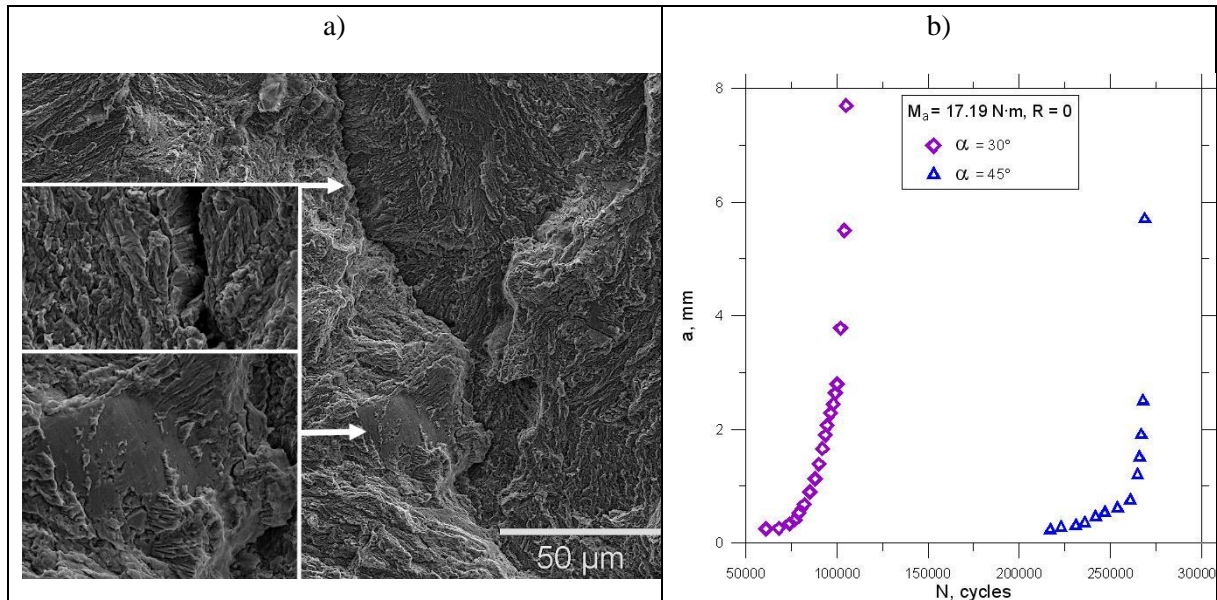
Celem niniejszej pracy jest opis rozwoju pęknięć zmęczeniowych w próbkach o przekroju prostokątnym wykonanych ze stali bainitycznej przy mieszanych sposobach obciążenia I+II i I+III.

## 2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Do badań zmęczeniowych zastosowano próbki o przekroju poprzecznym prostokątnym i wymiarach brutto  $8 \times 9$  mm. Próbki wykonano ze stali bainitycznej o składzie chemicznym (wag.%) 0.3C–2.5 (Mn + Cr)–0.8Si. Struktura oraz właściwości wytrzymałościowej badanej stali zostały przedstawione w poprzednich pracach [2, 3]. Badana stal została poddana procesom ciągłego chłodzenia bezpośrednio po obróbce plastycznej na gorąco. Grubość listew ferrytu bainitycznego mieściła się w zakresie submikrometrycznym. W strukturze obecny był również austenit szczątkowy o morfologii listwowej i blokowej, w którym częściowo widoczna była substruktura martenzytyczna (składnik M/A). Próbki miały nacięty centrycznie karb zewnętrzny, jednostronny o głębokości  $a_0 = 1$  mm i promieniach zaokrąglenia dna karbu  $\rho = 0,2$  mm. Badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych przy proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem (moda I+III) przeprowadzono na maszynie zmęczeniowej MZGS-100 [1] umożliwiającej realizację przebiegów cyklicznie zmiennych w postaci zginania, skręcania i proporcjonalnego zginania ze skręcaniem. Badania realizowano przy obciążeniu z kontrolowaną siłą (kontrolowano amplitudę momentu zginającego i skręcającego) w zakresie od inicjacji pęknięcia do zniszczenia próbki i przy częstotliwości obciążenia 28,4 Hz. Badania wykonano przy współczynniku asymetrii cyklu  $R = 0$  oraz przy stałej amplitudzie momentu  $M_a = 17,19$  N·m. Rozwój pęknięć zmęczeniowych obserwowano metodą optyczną na powierzchniach bocznych próbek. Przyrosty pęknięć zmęczeniowych mierzono z użyciem lunety o powiększeniu  $25\times$  z dokładnością 0,01 mm, notując jednocześnie liczbę cykli obciążenia  $N$ .

Wyniki badań doświadczalnych dla mód mieszanych przedstawiono w postaci wykresów długości pęknięć w funkcji liczby cykli  $a = f(N)$  i pokazano na rys. 1. Badania w zakresie I+II sposobu przepro-

wadzono na próbkach CTS (Compact Tension Shear) na maszynie wytrzymałościowej MTS810 wykorzystując specjalnie zaprojektowany układ pomiarowy. Próbkę poddawano precrackingowi w celu zaostrożenia wierzchołka karbu (I sposób obciążenia), a następnie poprzez zmianę kąta obciążenia realizowano różne konfiguracje obciążenia I+II. Początkowy obszar powierzchni pęknięcia (I sposób obciążenia) pokazano na rys. 1a. Przykładowe krzywe wzrostu pęknięcia zmęczeniowego pokazano na rys. 1b (I+III) sposób obciążenia. Na podstawie rys. 1b można zauważyć większe trwałości dla  $\alpha = 45^\circ$  niż dla  $\alpha = 30^\circ$  przy zginaniu ze skręcaniem.



Rys. 1. Rozwój pęknięć zmęczeniowych w stali bainitycznej:  
a) obszar inicjacji pęknięcia zmęczeniowego (I sposób obciążenia), b) krzywe wzrostu pęknięć (I+III) sposób pęknięcia

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] ROZUMEK D., LEWANDOWSKI J., LESIUK G., CORREIA J., *The influence of heat treatment on the behavior of fatigue crack growth in welded joints made of S355 under bending loading*, Int. J. Fatigue, 2020, Vol. 131.
- [2] KRÓLICKA A., LESIUK G., KUZIĄK R., RADWAŃSKI K., JANIK A., *The role of microstructure morphology on fracture mechanisms of continuously cooled bainitic steel designed for rails application*, Metall. Mater. Trans. A., 2023.
- [3] KRÓLICKA A., LESIUK G., RADWAŃSKI K., KUZIĄK R., JANIK A., MECH R., ZYGMUNT T., *Comparison of Fatigue Crack Growth Rate: Pearlitic Rail versus Bainitic Rail*, Int. J. Fatigue, 2021, 106280.

---

# ABAQUS UMAT IMPLEMENTATION FOR EVALUATING SHEAR BEHAVIOR IN SELECTIVELY LASER-SINTERED POLYAMIDE 12: AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACH

Daniela SCHOB<sup>1</sup>, Lukas RICHTER<sup>1</sup>, Philipp MAASCH<sup>1</sup>, Robert ROSZAK<sup>1,3</sup>,  
Grzegorz ZIÓŁKOWSKI<sup>2</sup>, Michał OLEJARCZYK<sup>2</sup>, Piotr GRUBER<sup>2</sup>,  
Emilia GROCHOWSKA<sup>2</sup>, Tomasz KURZYNOWSKI<sup>2</sup>, Matthias ZIEGENHORN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chair of Engineering mechanics and machine dynamics, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Senftenberg, Germany

<sup>2</sup> Centre for Advanced Manufacturing Technologies (CAMT-FPC), Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

<sup>3</sup> Institute of Applied Mechanics, Poznan University of Technology, Poznan, Poland

**Contact:** daniela.schob@b-tu.de

**Keywords:** Selective laser sintered polyamide 12 (PA12), shear loading, User material routine (UMAT), Chaboche Model, GTN-Model, Viscoplasticity, Computerthomographie

Additive manufacturing, especially Selective Laser Sintering (SLS) of polymers, allows for efficient production of small series of complex components. A striking feature of these components is the presence of significant voids in the material structure [1]. The effects of these defects on the material behavior necessitate the establishment of specific production and testing standards to ensure reproducibility and reliability [2].

Following previous investigations [1, 3] of PA12 under uniaxial loading, this work focuses on the experimental investigation of the material and damage behaviour of selectively laser-sintered PA12 under shear loading. In addition, a continuum mechanical model is created that integrates the investigated properties and the microstructure of the material. To achieve this, shear tests were conducted, and the material structure was analysed using computed tomography. The special properties of the laser-sintered material were modelled using the elastic-viscoplastic material model by Chaboche [4] and the Gurson–Tvergaard–Needleman damage model [5, 6]. The GTN-Model considered initial voids, the growing, nucleation and coalescence. To account for aspects of low stress triaxiality that the GTN model does not cover, the model was extended by the approach of Nashorn and Hutschinson [7]. A User Material Routine (UMAT) was implemented in Abaqus. The simulation results showed a high correspondence with the experimental data, confirming the validity and effectiveness of the model.

In future research, this approach could be combined with a thermomechanical approach [8] to further improve prediction capabilities. This could further optimize the additive manufacturing of polymers and expand their applications in various industrial sectors.

## REFERENCES

- [1] SCHOB D., ROSZAK R., SAGRADOV I., SPARR H., ZIEGENHORN M., KUPSCH A., LEONARD F., MÜLLER B.R., BRUNO G., *Experimental Determination and numerical Simulation of Material and Damage Behaviour of 3D printed Polyamide 12 under quasi-static loading*. Archives of Mechanics, 2019, 71, 507–526.
- [2] FORSTER A.M., *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials. State of the Art and Standards Applicability*, National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [3] SCHOB D., SAGRADOV I., ROSZAK R., SPARR H., FRANKE R., ZIEGENHORN M., KUPSCH A., LÉONARD F., MÜLLER B.R., BRUNO G., *Experimental determination and numerical simulation of material and damage behaviour of 3D printed polyamide 12 under cyclic loading*, Engineering Fracture Mechanics, 2020, 229.
- [4] CHABOCHE J.-L., *Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity*, International Journal of Plasticity 1989, (3), 247–302.
- [5] CHU C.C., NEEDLEMAN A., *Void Nucleation Effects in Biaxially Stretched Sheets*, J. Eng. Mater. Technol., 1980, 102 (3), 249.

- 
- [6] TVERGAARD V., *Interaction of very small voids with larger voids*. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(30), 3989–4000.
- [7] NAHSHON K., HUTCHINSON J.W., *Modification of the Gurson Model for shear failure*. European Journal of Mechanics – A/Solids, 2008, 27(1),1–17.
- [8] SPARR H., ROSZAK R., SAGRADOV I., SCHOB, D., ZIEGENHORN, M., (2020) *Thermo-viscoplastic material modelling for self-heating loads and its experimental verification*. Technische Mechanik, (40)

---

# NUMERICAL SIMULATION OF FATIGUE CRACK GROWTH IN TIAL6V4 HIP IMPLANTS UNDER DIFFERENT EXPLOITATION CONDITIONS

Aleksandar SEDMAK<sup>1</sup>, Tamara SMOLJANIĆ<sup>2</sup>, Simon SEDMAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia

<sup>2</sup> Innovation Center of the Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia

**Contact:** asedmak@mas.bg.ac.rs

**Keywords:** Ti-Al6-V4 alloy, hip implants, fatigue crack growth, corrosion, Extended Finite Element Method

One of the most important aspects of materials typically used in biomedical engineering is their resistance to various unfavourable exploitation conditions, which greatly impact their work life. In terms of extreme conditions, two major factors include fatigue and corrosion, and a combination of these can significantly decrease the expected life of various implants. The focus of this paper will be on hip implants made of Ti-Al6-4V titanium alloy, a material commonly used in such applications, due to its resistance to corrosion and biocompatibility. Research shown here was based on experimental testing of said alloy in order to determine its mechanical properties under different working environments, including normal, salty and humid conditions. Following the previous work which was mostly focused on XFEM numerical simulations of fatigue behaviour of hip implants with various neck geometries, it was decided to investigate the behaviour of the titanium alloy in question by using the linear elastic fracture mechanics approach, with special focus on corrosion and its effect on hip implant integrity.

For this purpose, the initial idea was to calculate stress intensity factor values for specimens from all three groups (regular, humid, salty conditions). CT specimens were used for these experiments, however, due to their insufficient thickness an alternative approach had to be adopted – instead of calculating the values of KIC, as is common practice, parameter  $Kq$  was determined. This provided insight into how different aggressive environments affected the behaviour of Ti-Al6-V4 alloy specimens, i.e., how much their resistance to crack growth would degrade depending on the conditions in which they were kept, and which corresponded to real exploitation conditions of hip implants.

To further validate the approach that was used in this research, numerical simulations based on the obtained experimental and analytical data were performed on models representing an orthopaedic hip implant, for all three groups of specimens (normal, humid and salty conditions). The goal was to relate the data obtained for plane stress state (experiments with CT specimens) with a numerical analysis which involved plane strain state (actual hip models).

---

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON FATIGUE BEHAVIOUR OF S460 PLATE WITH CRUCIFORM JOINTS

Stanislav SEITL<sup>1</sup>, Pavel POKORNÝ<sup>1</sup>, Vít KŘIVÝ<sup>2</sup>, Jan KLUSÁK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics of Materials, Czech Academy of Sciences, v. v. i. Žitkova 513/22, 616 00 Brno, Czech Republic

<sup>2</sup> Faculty of Civil Engineering, VSB – Technical University of Ostrava, Ludvika Podeste 1875/17,  
708 00 Ostrava-Poruba, Czech Republic

**Contact:** seitl.s@fce.vutbr.cz

**Keywords:** high strength steel, welded structures, fatigue resistance, S460

The benefits of using high strength steel (HSS) in steel structures are clear: In comparison to normal strength steel the size of the cross section can be reduced resulting in a decrease of the dead weight of the structure, from which the substructure and the erection profit and reduced cross section of welded joints by which fabrication and inspection costs can be reduced and higher clearance heights under overpasses can be ensured. For this reason higher strength steel are not only used for bigger landmark bridges but also for more convenient medium span bridges.

The fatigue resistance of welded structures limits the use of higher strength steel in dynamically loaded constructions. It is understood that the fatigue resistance of welded details performed under normal conditions is more or less the same for normal mild steel and for higher strength grades. So unfortunately the better fatigue behaviour of high strength steel cannot be used. Thus it can happen that the designer of steel structures cannot profit from the higher static strength of high-strength grades if the construction is dynamically loaded.

In this contribution welding processes applied like cruciform joints are studied in relation to the fatigue strength of high strength steel – S 460.

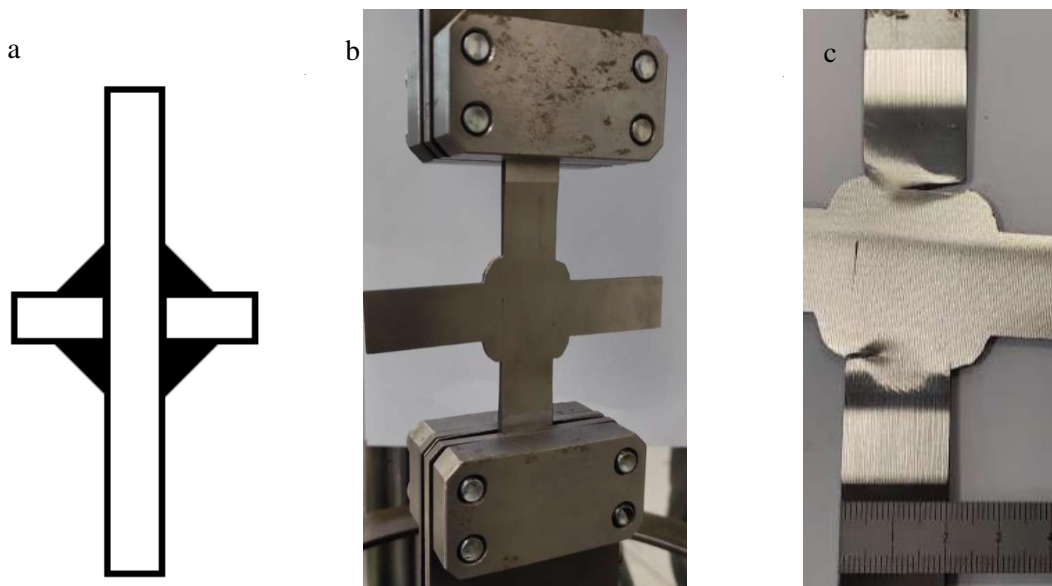


Fig. 1. a) sketch of test specimen from welded panels, b) experimental set up and c) specimens after fatigue test



---

## ACKNOWLEDGMENTS

This contribution has been developed as a part of the research project GACR 21-14886S “Influence of material properties of high strength steels on durability of engineering structures and bridges” supported by the Czech Science Foundation.

---

# A COMPARATIVE STUDY ON PROBABILISTIC MODELLING OF FATIGUE STRENGTH CURVES AND THEIR USE IN FATIGUE DAMAGE EVALUATIONS OF RIVETED CONNECTIONS

João Nuno SILVA<sup>1</sup>, António M. MOURÃO<sup>1</sup>, Cláudio HORAS<sup>1</sup>,  
José A.F.O. CORREIA<sup>1</sup>, Abílio De JESUS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CONSTRUCT, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal

<sup>2</sup> INEGI, University of Porto, Faculty of Engineering, Porto, Portugal

**Contact:** jnsilva@fe.up.pt

**Keywords:** Bridge, Riveted Connections, Probabilistic Modelling, Fatigue Accumulation

Fatigue is a major cause of component and structural failure, including bridges. This is due to factors such as inadequate maintenance plans, increased traffic demands, and long-term exposure to environmental agents. In Europe, an estimated 200,000 metal bridges are at risk of fatigue failure, and this number is three times higher in the United States. Therefore, accurate and reliable fatigue assessments are essential. The study investigates the interaction between probabilistic analysis and fatigue accumulation rules for the fatigue life assessment of riveted bridge connections. Various probabilistic methodologies were employed, including the standardized approach (ISO 12107), the probabilistic method based on the two-parameter Weibull probability density function, and the Castillo and Fernández-Canteli method based on the three parameter Weibull distribution, and the Markov-Chain Monte Carlo method were used to derive the design fatigue strength curves. The classical linear regression and orthogonal linear regression methods were then explored to fit the curves. Finally, the linear fatigue accumulation rule of Palmgren–Miner was applied to each of the previously generated design curves. The study provides valuable insights into the use of probabilistic models to obtain the design fatigue strength curves and to be used for the fatigue damage assessment of ancient riveted bridge connections. The results of this study can be used to improve the reuse design of these structures.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the base funding - UIDB/04708/2020 and the programmatic funding – UIDP/04708/2020 of the CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC). This work is also a result of Agenda “Smart Wagons: Development of Production Capacity in Portugal of Smart Wagons for Freight”, nr. C644940527-00000048, investment project no. 27, financed by the Recovery and Resilience Plan (PRR) and by European Union – NextGeneration EU. António Mourão would like to thank the Ph.D. research grant (PD/BD/150306/2019) awarded by national funds (PIDDAC) through the Portuguese Science Foundation (FCT/MCTES).

---

# WPLYW UŁOŻENIA WARSTW WZMACNIAJĄCYCH NA ABSORPCJĘ ENERGII UDERZENIA POCISKU PARABELLUM W WIELOWARSTWOWY MATERIAŁ KOMPOZYTOWY

Sebastian SŁAWSKI<sup>1</sup>, Teresa FRAS<sup>2</sup>, Sławomir DUDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, Polska

<sup>2</sup> French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), 5 Rue du Général Cassagnou, 68300 Saint-Louis, Francja

**Kontakt:** sebastian.slawski@polsl.pl

**Słowa kluczowe:** kompozyt wielowarstwowy, absorpcja energii, Parabellum, włókno aramidowe, włókno węglowe

## 1. WPROWADZENIE

Wielowarstwowe materiały kompozytowe wzmocnione włóknem ciągłym są powszechnie stosowane w wielu gałęziach przemysłu, takich jak np. przemysł stoczniowy, lotniczy, energetyczny, samochodowy czy też wojskowy. Duża popularność wielowarstwowych materiałów kompozytowych wynika z ich własności mechanicznych, takich jak niska gęstość, wysoka wytrzymałość oraz sztywność [1]. Niezależnie od zastosowania, materiały te narażone są na obciążenia o charakterze udarowym. Szczególnym, a zarazem najbardziej wymagającym przypadkiem jest wykorzystanie wielowarstwowych materiałów kompozytowych do produkcji paneli energochłonnych oraz środków ochrony osobistej. Odporność na obciążenia o charakterze udarowym wielowarstwowych materiałów kompozytowych jest zagadnieniem złożonym, zależnym od wielu czynników. W trakcie uderzenia pocisku w osłonę wykonaną z wielowarstwowego materiału kompozytowego wyróżnić można takie zjawiska energochłonne, jak: niszczenie włókien pierwotnych, deformacja włókien wtórnych, ścinanie włókien, delaminacje, pękanie matrycy, tarcie pomiędzy pociskiem a materiałem kompozytowym, odkształcenie plastyczne pocisku [2, 3]. Podstawowym elementem przenoszącym obciążenia w wielowarstwowych materiałach kompozytowych są włókna wzmocniające. Wykorzystane włókna wzmocniające mają tak więc znaczny wpływ na własności mechaniczne oraz użytkowe wielowarstwowych materiałów kompozytowych [4]. Najczęściej stosowanymi włóknami wzmocniającymi są włókna szklane, aramidowe, bazaltowe, polietylenowe czy też węglowe. Wielowarstwowe materiały kompozytowe wzmocnione mogą być zarówno jednym jak i kilkoma typami włókien wzmocniających (wzmocnienie hybrydowe). W przypadku zastosowania materiałów wzmocniających wykonanych z więcej niż jednego typu włókien wzmocniających możliwe jest uzyskanie materiału o własnościach lepszych niż w przypadku zastosowania wyłącznie jednego typu materiału wzmocniającego [5]. Istotne jest jednak prawidłowe dobranie oraz ułożenie warstw wzmocniających. Ze względu na mnogość możliwych do utworzenia kombinacji materiałowych oraz duże zainteresowanie wielowarstwowymi materiałami kompozytowymi badania związane z odpornością udarową wielowarstwowych materiałów kompozytowych są obiektem zainteresowania wielu naukowców z całego świata [6–8].

## 2. METODYKA

Badania polegające na określeniu spadku prędkości pocisku w trakcie penetracji osłony energochłonnej zostały przeprowadzone dla 11 różnych wariantów wielowarstwowego materiału kompozytowego. Szesnaście warstwowe panele energochłonne o wymiarach 200 × 200 mm zostały wykonane metodą laminowania ręcznego z wykorzystaniem podciśnienia. Jako osnowę wykorzystano żywicę epoksydową LG285 oraz dedykowany przez producenta utwardzacz HG285. Jako wzmocnienie zastosowano tkaninę wykonaną z włó-

---

kien aramidowych (Twaron 2200) oraz tkaninę wykonaną z włókien węglowych (Pyrofil TR30 S). Wykonane zostały panele energochłonne składające się wyłącznie z włókien aramidowych oraz węglowych, jak i panele o wzmocnieniu hybrydowym składające się z ośmiu warstw wzmacniających z włókien aramidowych (A) oraz ośmiu warstw wzmacniających z włókien węglowych (W). Kolejność układania warstw wzmacniających w panelach o wzmocnieniu hybrydowym była inna w każdym z analizowanych przypadków. W trakcie badań wykorzystano amunicję  $9 \times 19$  mm Parabellum. W celu zwiększenia powtarzalności prędkości pocisku ilość prochu znajdującego się wewnątrz naboju była precyzyjnie odmierzona. Średnia prędkość początkowa pocisku wynosiła 370 m/s. Badane panele energochłonne montowane były w stalowej ramie ustawionej pod kątem  $90^\circ$  do toru lotu pocisku. Bariera służąca do pomiaru prędkości początkowej pocisku umieszczona była w niewielkiej odległości od badanej próbki. Uderzenie rejestrowane było przez ultra szybką kamerę Shimadzu HPV-X2 oraz aparaturę rentgenowską. Na podstawie zarejestrowanych nagrań oraz obrazów wyznaczono prędkość pocisku po penetracji badanych paneli.

### 3. WYNIKI

Największy spadek prędkości pocisku Parabellum w trakcie penetracji badanych paneli energochłonnych zarejestrowano dla wariantu w którym panel wzmacniany był wyłącznie tkaniną wykonaną z włókna aramidowego (16A). Proces grzybkowania pocisku był również najbardziej zaawansowany w tym przypadku. Najmniejszy spadek prędkości zarejestrowano dla wariantu w którym panel wzmacniany był wyłącznie tkaniną wykonaną z włókna węglowego (16W). Największy spadek prędkości pocisku w przypadku paneli o wzmocnieniu hybrydowym zarejestrowano dla wariantu w którym osiem warstw wzmacniających wykonanych z włókna aramidowego zostało umieszczonych pomiędzy czterowarstwowymi okładkami wykonanymi z włókien węglowych (4C8A4C). Nieznacznie mniejszy spadek prędkości pocisku zarejestrowano dla konfiguracji 8C8A. Najmniejszy spadek prędkości pocisku zarejestrowano dla kombinacji w której warstwy wzmacniające z włókien aramidowych oraz węglowych zostały ułożone naprzemiennie (ACACACACACACACAC). Na podstawie wyników uzyskanych dla paneli energochłonnych o wzmocnieniu hybrydowym można stwierdzić, że największy spadek prędkości pocisku obserwowany był dla przypadków w których warstwy wzmacniające wykonane z włókien aramidowych znajdowały się po stronie przeciwnej do strony uderzenia. Ponadto, większe spadki prędkości pocisku obserwowane były dla kombinacji w których warstwy wzmacniające wykonane z włókien aramidowych ułożone były jedna za drugą.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] AKELLA K., NAIK N.K., *Composite armour – A review*, Journal of the Indian Institute of Science, 2015, Vol. 95, No. 3, 297–312.
- [2] JAMROZIAK K., *Identyfikacja własności materiałów w balistyce końcowej*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
- [3] NAIK N.K., SHRIRAO P., REDDY B.C.K., *Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation*, International Journal of Impact Engineering, 2006, Vol. 32, No. 9, 1521–1552.
- [4] SŁAWSKI S., SZYMICZEK M., KACZMARCZYK J., DOMIN J., ŚWITOŃSKI E., *Low velocity impact response and tensile strength of epoxy composites with different reinforcing materials*, Materials, 2020, Vol. 13, No. 14, 3059.
- [5] SARASINI F., TIRILLÒ J., VALENTE M., FERRANTE L., CIOFFI S., IANNACE S., SORRENTINO L., *Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties*, Materials & Design, 2013, Vol. 49, 290–302.
- [6] PACH J., MAYER P., JAMROZIAK K., POLAK S., PYKA D., *Experimental analysis of puncture resistance of aramid laminates on styrene-butadiene-styrene and epoxy resin matrix for ballistic applications*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, Vol. 19, No. 4, 1327–1337.
- [7] GUSTIN J., JONESON A., MAHINFALAH M., STONE J., *Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites*, Composite Structures, 2005, Vol. 69, No. 4, 396–406.
- [8] KHODADADI A., LIAGHAT G., BAHRAMIAN A.R., AHMADI H., ANANI Y., ASEMANI S., RAZMKHAH O., *High velocity impact behavior of Kevlar/rubber and Kevlar/epoxy composites: A comparative study*, Composite Structures, 2019, Vol. 216, 159–167.

---

# WPLYW UZIARNIENIA I WYTRZYMAŁOŚCI KRUSZYWA NA PARAMETRY PĘKANIA BETONU

Marta SŁOWIK<sup>1</sup>, Amanda AKRAM<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40, 20-802 Lublin

**Kontakt:** m.slowik@pollub.pl

**Słowa kluczowe:** beton, kruszywo, współczynnik intensywności naprężeń, wytrzymałość betonu na rozciąganie, wytrzymałość kruszywa

## 1. WSTĘP

Głównymi elementami wewnętrznej struktury stwardniałego betonu są ziarna kruszywa, stwardniała matryca cementowa oraz strefa przejściowa pomiędzy nimi (Interfacial Transition Zone – ITZ). Ich konfiguracja wpływa na cechy fizykomechaniczne stwardniałego betonu. Do podstawowych parametrów betonu stosowanych przy określaniu odporności konstrukcji na pękanie zaliczyć można wytrzymałość betonu na rozciąganie i współczynnik intensywności naprężeń. Na podstawie analizy wyników badań dostępnych w literaturze można stwierdzić, że parametry kruszywa, zarówno rodzaj i skład petrograficzny, jak i cechy geometryczne, mają znaczący wpływ na cechy betonu [1, 2], w tym także na parametry pękania betonu [3]. Jednakże trudno jest jednoznacznie określić wpływ poszczególnych parametrów kruszywa na cechy betonu z uwagi na fakt, że badania nie były prowadzone w sposób kompleksowy. W poszczególnych badaniach koncentrowano się na jednym rodzaju kruszywa lub na mieszance kruszyw o tym samym maksymalnym uziarnieniu. W celu przeprowadzenia szerszej analizy wpływu uziarnienia i wytrzymałości kruszywa na wybrane parametry pękania betonu przeprowadzono własne badania eksperymentalne.

## 2. WYNIKI BADAŃ I WNIOSKI

Badania laboratoryjne obejmowały wyznaczenia wytrzymałości betonu na rozciąganie ( $f_{ct,sp}$ ) i współczynnika intensywności naprężeń ( $K_{Ic}$ ) w przypadku betonów konstrukcyjnych wykonanych na bazie trzech rodzajów kruszywa (żwir, dolomit i granit). W przypadku każdego rodzaju kruszywa przyjęto również dwie różne mieszanki frakcji kruszywa o maksymalnym wymiarze ziaren  $D_{max}$  do 16 i 22 mm. Badania wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm i długości 300 mm. Badania współczynnika intensywności naprężeń przeprowadzono na belkach o wymiarach 80 × 150 × 700 mm w I modelu pękania. Dodatkowo przeprowadzono badanie modułu sprężystości betonu ( $E_{cm}$ ).

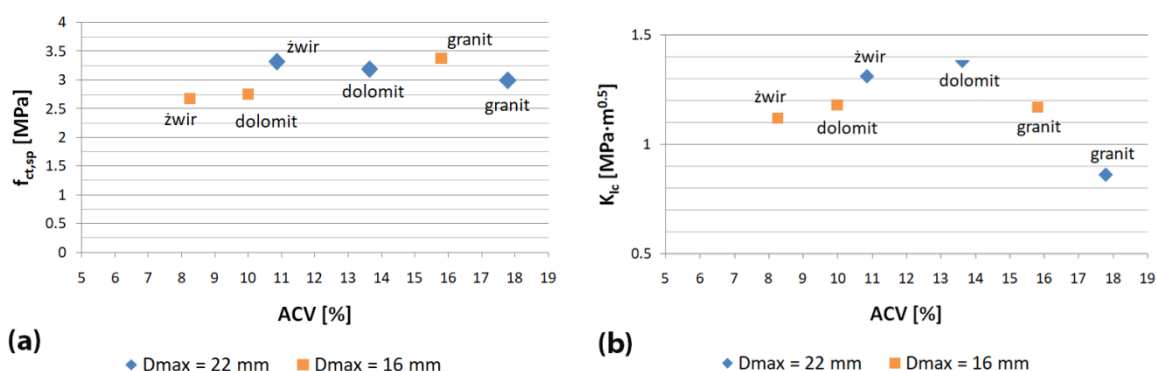
W celu oceny cech wytrzymałościowych kruszywa wyznaczono doświadczalnie współczynnik miażdżenia kruszywa (ACV) w przypadku wszystkich trzech rodzajów kruszywa zarówno dla poszczególnych frakcji, jak i końcowych mieszanek frakcji. Normowe badanie współczynnika miażdżenia kruszywa pozwala na określenie odporności na rozkruszenie, a tym samym wytrzymałości kruszywa. Wyniki badań właściwości betonu i kruszywa przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań

Seria	Rodzaj kruszywa	$D_{max}$	ACV	$E_{cm}$	$f_{ct,sp}$	$K_{Ic}$
	[-]	[mm]	[%]	[GPa]	[MPa]	[MPa·m <sup>0.5</sup> ]
L16N	żwir	16	8,24	29,3	2,68	1,12
L22N		22	10,85	30,5	3,32	1,31
L16D	dolomit	16	9,99	30,3	2,76	1,18
L22D		22	13,63	31,9	3,19	1,38
L16G	granit	16	15,80	25,0	3,39	1,17
L22G		22	17,79	21,9	2,99	0,86

Zależność wytrzymałości betonu na rozciąganie i współczynnika intensywności naprężeń od współczynnika miażdżenia kruszywa z uwzględnieniem uziarnienia kruszywa zestawiono na rys. 1. W przypadku betonów o maksymalnym wymiarze ziaren do 16 mm wraz ze wzrostem ACV odnotowano wzrost wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu. Natomiast w betonach o uziarnieniu do 22 mm wzrost ACV skutkował spadkiem wytrzymałości betonu na rozciąganie (rys. 1a).

W przypadku współczynnika intensywności naprężeń istotnym parametrem okazał się moduł sprężystości betonu (znacząco niższa wartość dla granitu). Dla serii z maksymalnym uziarnieniem  $D_{max} = 22$  mm otrzymano wyższe wartości  $K_{Ic}$  w porównaniu do serii o  $D_{max} = 16$  mm, za wyjątkiem betonów z kruszywem granitowym, dla których uzyskano odwrotną zależność (rys.1.b).

Rys. 1. Zależność  $f_{ct,sp}$  oraz  $K_{Ic}$  od uziarnienia i współczynnika miażdżenia kruszywa

Nie można było jednoznacznie określić korelacji między wytrzymałością betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu i współczynnikiem intensywności naprężeń a wytrzymałością kruszywa z uwagi na znaczny wpływ modułu sprężystości, który to parametr jest także zależny od rodzaju i uziarnienia kruszywa. Nie bez znaczenia jest również ocena roli strefy przejściowej między ziarnami kruszywa a matrycą cementową. Stwierdzono, że parametry kruszywa mają znaczący wpływ przy ocenie parametrów pęknięcia betonu. W celu trafnego określenia zależności między parametrami pęknięcia betonu a cechami kruszywa kluczowe jest przeprowadzenie analizy wieloczynnikowej.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] VISHALAKSHI K.P., REVATHI V., SIVAMURTHY REDDY S., *Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete*, Engineering Fracture Mechanics, 2018, Vol. 194, 52–630.
- [2] BEUSHAUSEN H., DITTMER T., *The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete*, Construction and Building Materials, 2015, Vol. 74, 132–139.
- [3] KHALILPOUR S., BANI ASAD E., DEHESTANI M., *A review on concrete fracture energy and effective parameters*, Cement and Concrete Research, 2019, Vol. 120, 294–321.

---

# PRZYGOTOWANIE MODELU UCZENIA MASZYNOWEGO BAZUJĄC NA EMISJI AKUSTYCZNEJ DO IDENTYFIKACJI PRZYCZYŃ DEGRADACJI KOMPOZYTÓW

Michał SMOLNICKI, Grzegorz LESIUK, Paweł ZIELONKA,  
Paweł STABLA, Szymon DUDA

Wrocław University of Science and Technology

**Kontakt:** [michal.smolnicki@pwr.edu.pl](mailto:michal.smolnicki@pwr.edu.pl)

**Słowa kluczowe:** uczenie maszynowe, emisja akustyczna

## 1. WSTĘP

Materiały kompozytowe ulegają degradacji na wiele różnych sposobów. Wyróżniamy więc uszkodzenia włókien i osnowy zarówno w stanie rozciągającym, jak i zginającym oraz wyboczenie włókien (ang. *kinking*), odspojenie włókien od osnowy (ang. *debonding*) czy też rozwarstwienie (ang. *delamination*). Dlatego szczególnie istotnym zagadnieniem przy analizie degradacji kompozytów jest rozpoznanie z jakim rodzajem zniszczenia bądź ich kombinacją mamy do czynienia. Wśród metod badania kompozytów można wyróżnić analizę emisji akustycznej. Technika ta polega na rejestracji fali sprężystej powstałej przy zjawiskach degradacji (lub innych) poprzez czujniki a następnie analizowaniu sygnału. W tabeli 1 pokazano najważniejsze cechy sygnału rejestrowane przez system emisji akustycznej. Dodatkowe cechy mogą zostać obliczone poprzez operacje arytmetyczne.

Tabela 1. Opis najważniejszych cech zdarzenia akustycznego wykorzystywanych do jego opisu

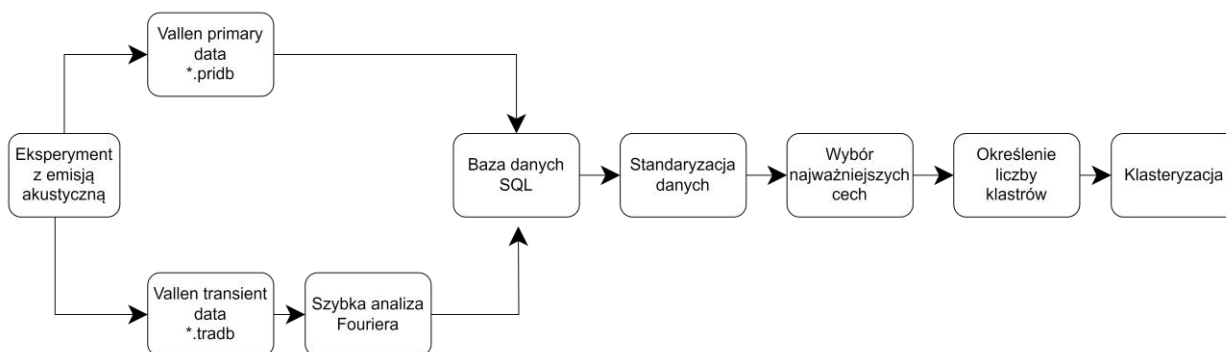
cecha	definicja
A	amplituda
RT	czas narastania
E	energia
RMS	Średniokwadratowa siła szumu
c-freq	środek ciężkości widma częstotliwości
D	czas trwania zdarzenia
p-freq	maksimum częstotliwości
CNT	liczba zdarzeń
CSS	kumulatywna siła sygnału

Uczenie maszynowe jest podgrupą algorytmów określanymi zbiorczo jako sztuczna inteligencja. Techniki uczenia maszynowego mogą pomagać w predykowaniu lub klasyfikowaniu danych (uczenie nadzorowane), ale również działać bez wcześniejszej bazy wiedzy (uczenie nienadzorowane). Tego typu podejście stosowane jest na przykład do klastrowania (czyli dzielenia na grupy) danych – i właśnie takie algorytmy proponujemy sprawdzić do zbiorów danych zgromadzonych przy użyciu emisji akustycznej.

## 2. PRZYGOTOWANIE MODELI UCZENIA MASZYNOWEGO

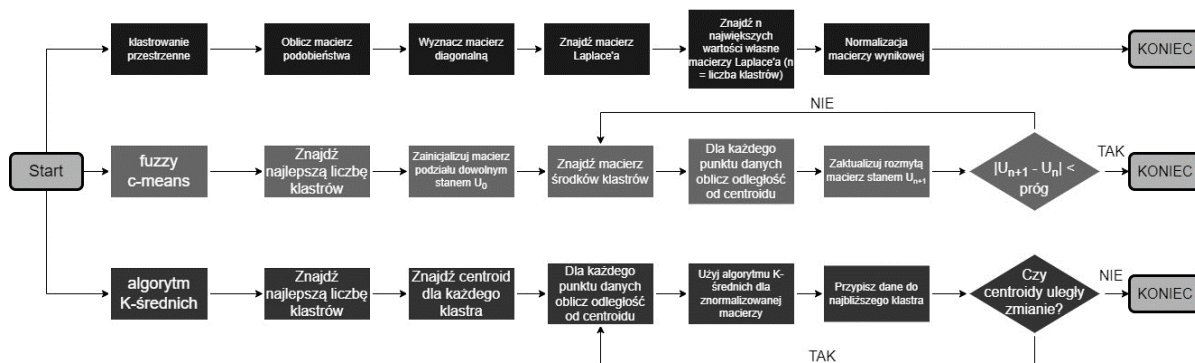
Przygotowanie modelu należy poprzedzić obrobieniem surowych danych, które w tym przypadku uzyskujemy z emisji akustycznej. W trakcie eksperymentu z emisją akustyczną przy użyciu urządzeń firmy Vallen informacje są gromadzone w dwóch bazach danych (SQL) z rozszerzeniami .pridb (główne informacje) oraz .tradb (przebiegi czasowe). Przy użyciu skryptów SQL możliwe jest połączenie tych informacji w jedną bazę danych, sprawdzenie jakości danych, czy wygenerowanie dodatkowych cech sygnału.

Kolejnymi etapami jest ujednoczenie danych – często przy wykorzystaniu standaryzacji. Następnie wybór najważniejszych cech – przy użyciu analizy głównych składowych bądź innych metod, takich jak Laplace’a score.



Rys. 1. Ogólna idea klastrowania sygnałów z emisji akustycznej przy wykorzystaniu technik uczenia maszynowego

Klasteryzacja jest problemem zaliczonym do uczenia maszynowego nienadzorowanego (nie znamy a priori dobrej odpowiedzi). Zazwyczaj proces klasteryzacji poprzedzony jest więc wyznaczeniem preferowanej liczby klastrow. Jest wiele stosowanych metod klastrowania – w mechanice do tej pory najczęściej wykorzystywana jest metoda  $k$ -średnich. W realizowanym projekcie zdecydowano się sprawdzić również dwie inne metody – fuzji  $c$ -means oraz klastrowanie przestrzenne.



Rys. 2. Przykładowe techniki klastrowania w postaci schematów blokowych – klastrowanie przestrzenne, fuzji  $c$ -means i algorytm  $k$ -średnich

## FINANSOWANIE

Prezentowane wyniki badań, zrealizowane w ramach zadania badawczego p/t. Identyfikacja zjawisk degradacyjnych w materiałach kompozytowych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego i emisji akustycznej finansowanego ze środków subwencji projakościowej na rozwój potencjału badawczego Wydziału Mechanicznego PWr w roku 2023.



---

# WZMACNIANIE USZKODZONYCH BELEK Z DREWNA I MATERIAŁÓW DREWNOPOCHODNYCH TAŚMAMI CFRP

Tomasz SOCHA<sup>1</sup>, Arkadiusz DENISIEWICZ<sup>1</sup>, Krzysztof KULA<sup>1</sup>,  
Grzegorz LESIUK<sup>2</sup>, Wojciech BŁAŻEJEWSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Prof. Z. Szafrana 1, 65-246 Zielona Góra

<sup>2</sup> Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, ul. M. Smoluchowskiego 25, 50-730 Wrocław

**Kontakt:** T.Socha@ib.uz.zgora.pl

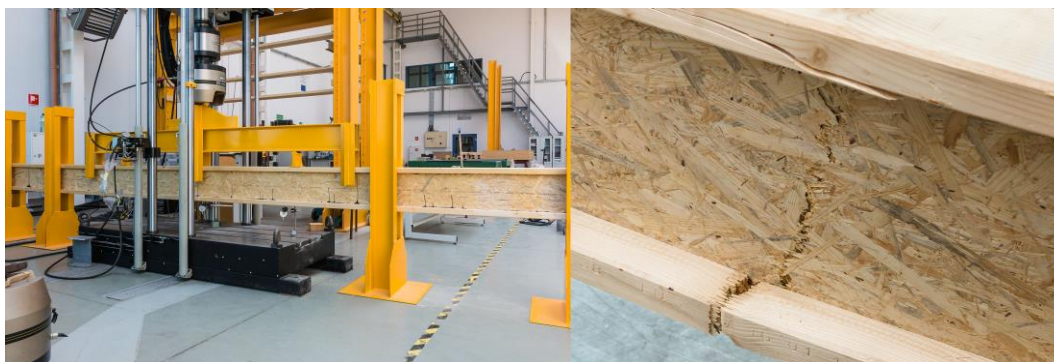
**Słowa kluczowe:** CFRP, materiały drewnopochodne, MES, wzmocnianie

## 1. WPROWADZENIE

Niniejszy artykuł dotyczy pracy belek dwuteowych ze środkiem z płyty OSB i pasami drewnianymi, w których występują uszkodzenia. Testy laboratoryjne tego typu belek wykazały znaczny spadek nośności w osłabionych strefach, szczególnie w miejscu połączenia na pióro – wpust dwóch części pasa dolnego lub w punktach występowania sęków. Nieprawidłowo wykonane połączenie może znacząco obniżać nośność całego elementu. Zaproponowano wzmocnienie tych stref za pomocą taśm kompozytowych na bazie włókien węglowych CFRP.

Najbardziej popularne jest wzmocnienie taśmą CFRP na całej długości belki, ale stosuje się też wzmocnienie segmentowe [1, 2]. Tego rodzaju wzmocnienie skutecznie zwiększa nośność i pozwala uniknąć wpływu wad (sęków, łączników, połączeń, pęknięć), a jednocześnie prowadzi do obniżenia kosztów w porównaniu ze wzmocnieniem ciągłym.

Badania doświadczalne belek dwuteowych wykonanych z drewna i materiałów drewnopochodnych przeprowadzono w laboratorium Instytutu Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego. Badaniom poddano trzy belki dwuteowe wykonane z drewna sosnowego i płyty OSB (rozpiętość 528 cm, wysokość 30 cm) w próbie czteropunktowego zginania (rys. 1).

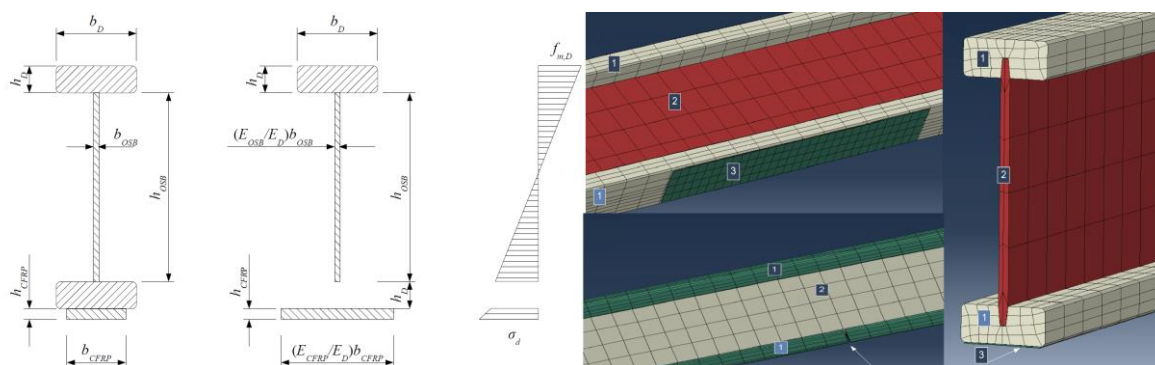


Rys. 1. Belka w trakcie badań i zniszczone połączenie w pasie dolnym

W jednej z belek połączenie części pasa dolnego na pióro – wpust znajdowało się w środku rozpiętości. Było ono najsłabszym punktem belki, jako pierwsze uległo zniszczeniu, zaś spadek nośności w porównaniu do deklarowanej przez producenta, wyniósł 17%.

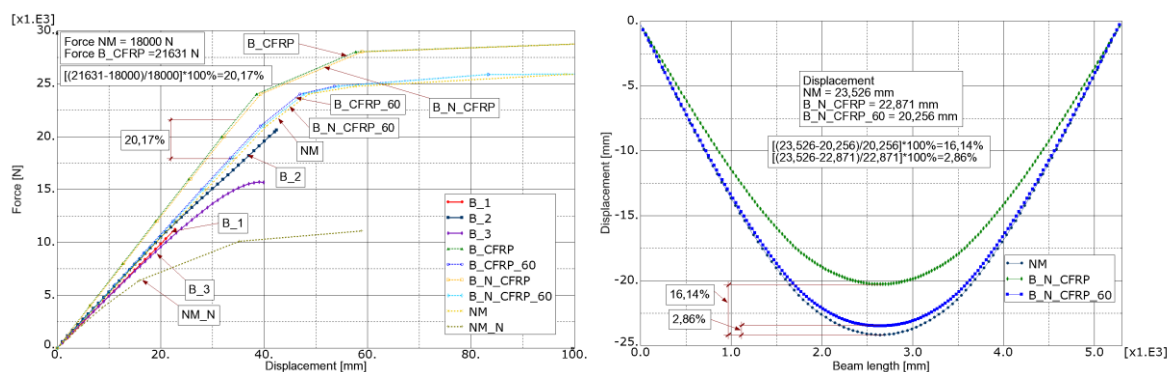
## 2. OBLICZENIA I WNIOSKI

W celu eliminacji uszkodzenia zaproponowano wzmocnienie pasa dolnego taśmą CFRP. Przyjęto, iż wytrzymałość na ścinanie warstwy kleju pomiędzy drewnem i CFRP jest wyższa niż wytrzymałość drewna na ścinanie wzdłuż włókien. Rozpatrzono skrajny przypadek – naprężenie w pasie dolnym jest przenoszone w całości przez taśmę CFRP. Wykorzystano koncepcję przekroju zastępczego, w którym pola przekroju taśmy CFRP i płyty OSB są sprowadzane do pola drewna z wykorzystaniem stosunków modułów sprężystości podłużnej (rys. 2). Do modelowania numerycznego wykorzystano środowisko MES ABAQUS. Obliczenia przeprowadzono dla przypadków: NM (belka badana w laboratorium), NM\_N (uszkodzenie w środku pasa dolnego), B\_CFRP (CFRP wzdłuż całej dolnej półki), B\_CFRP\_60 (CFRP w strefie środkowej na obliczonej analitycznie długości zakotwienia), B\_N\_CFRP (uszkodzenie i CFRP wzdłuż całej dolnej półki), B\_N\_CFRP\_60 (uszkodzenie i CFRP na obliczonej analitycznie długości zakotwienia).



Rys. 2. Przekrój rzeczywisty, zastępczy i model numeryczny belki

Wyniki numeryczne belki NM bez wzmocnienia są zgodne z eksperymentem. Wpływ CFRP na nośność zależy od długości taśmy (rys. 3), np. wzrost wynosi 20,17% dla taśmy wzdłuż całej belki. Ugięcie odcinkowo wzmocnionej belki jest mniejsze o 2,86% i 16,14%, gdy wzmocniona jest cała dolna półka.



Rys. 3. Zależność ugięcie – siła (po lewej) i gięcia belek (po prawej) obliczone numerycznie

Testy numeryczne potwierdziły zasadność stosowania wzmocnienia odcinkowego taśmą CFRP w celu zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie w osłabionej strefie.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] KHELIFA M., CELZARD A., *Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips*, Composite Structures, 2014, 111, 393–400.
- [2] LIS Z., RAPP P., *Odtworzenie nośności osłabionej strefy rozciąganej w belkach drewnianych za pomocą taśm z włókien węglowych*, In: V Konferencja Naukowa Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych – Referaty, Szczecin, 17–18 maja 2002, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2002, 221–228.

---

## MODELING OF CRACK PROPAGATION IN UHMWPE MATERIAL SUBJECTED TO IMPACT LOAD

Maksymilian STĘPCZAK<sup>1</sup>, Dariusz PYKA<sup>2</sup>, Adam KURZAWA<sup>3</sup>,  
Mirosław BOCIAN<sup>2</sup>, Krzysztof JAMROZIAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Smoluchowskiego 25,  
50-370 Wrocław, Poland

<sup>2</sup> Department of Mechanics, Materials Science and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University  
of Science and Technology, Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland

<sup>3</sup> Department of Lightweight Elements Engineering, Foundry and Automation, Faculty of Mechanical Engineering,  
Wrocław University of Science and Technology, Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland

**Contact:** [dariusz.pyka@pwr.edu.pl](mailto:dariusz.pyka@pwr.edu.pl), [miroslaw.bocian@pwr.edu.pl](mailto:miroslaw.bocian@pwr.edu.pl), [krzysztof.jamroziak@pwr.edu.pl](mailto:krzysztof.jamroziak@pwr.edu.pl), [adam.kurzawa@pwr.edu.pl](mailto:adam.kurzawa@pwr.edu.pl),  
[maksymilianstep@gmail.com](mailto:maksymilianstep@gmail.com)

**Key words:** fracture mechanics, impact strength, PE UHMV, delamination, numerical analysis

In this study, the authors analyzed the effect of delamination and fracture propagation of high-density polyethylene material UHMWPE (Ultrahigh molecular weight polyethylene) subjected to impact load. The tests used with steel core based ammunition such as:  $7.62 \times 54R$  mm FMJ ŁPS projectile and  $7.62 \times 39$  mm FMJ PS projectile to evaluate the fracture propagation of individual layers and material delamination at different velocity variants taking into account the mechanical properties of the penetrator material. In addition, the authors performed numerical analyses in the ABAQUS/Explicit environment using hybrid numerical methods based on the transition from the classical FEM method for describing continuous structures to SPH methods describing structural discontinuities. The strain limit described as  $\varepsilon_{gr}$  was assumed as the limit value. Authors validated the adopted rheological model by comparing two nonlinear mathematical models of their strain–stress description, comparing the results obtained first in a quasi-static test, then comparing the results obtained in ballistic tests.

---

# BADANIA PROGRAMOWANE STALI S355J2+N W ZAKRESIE WYSOKO- I GIGACYKLOWYM

Piotr SWACHA, Adam LIPSKI, Michał PIOTROWSKI

<sup>1</sup> Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,  
Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

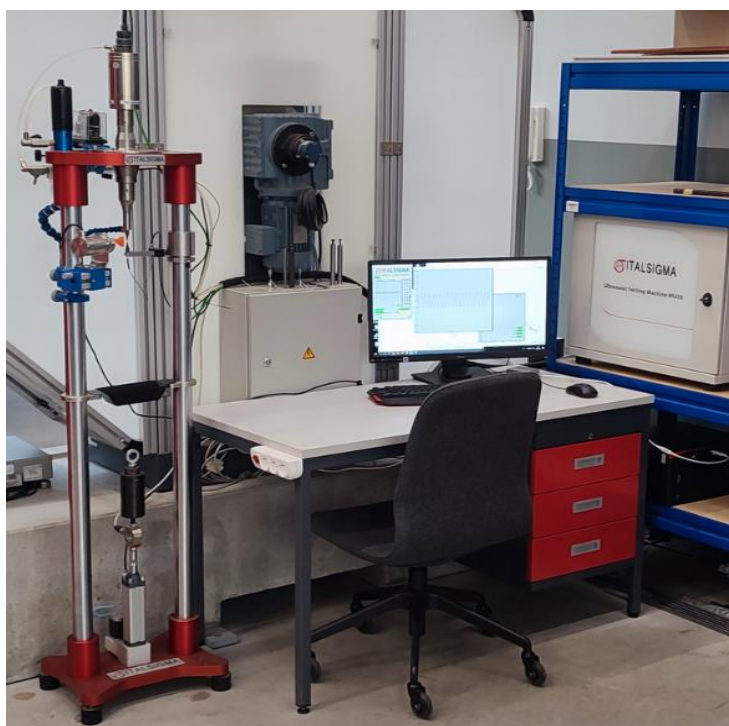
**Kontakt:** piotr.swacha@utp.edu.pl

**Słowa kluczowe:** badania programowane, zmęczenie gigacyklowe, hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, stal konstrukcyjna

## 1. WPROWADZENIE

Elementy maszyn w rzeczywistych warunkach eksploatacji poddawane są obciążeniom o charakterze nieregularnym. Przebieg tych obciążeń jest sumą różnego rodzaju wymuszeń wynikających z cech obiektu, czynników roboczych oraz oddziaływań otoczenia. Naprężenia o niejednakowej wartości działające przez  $n_i$  cykli powodują różny stopień uszkodzenia zmęczeniowego elementu. Aby przewidzieć moment, w którym suma uszkodzeń zmęczeniowych spowoduje zniszczenie elementu stosuje się hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych [1, 2].

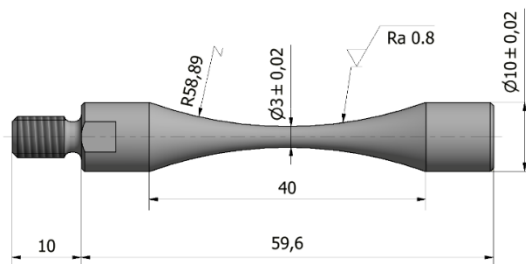
Elementy wykonane ze stali konstrukcyjnych o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych, bardzo często charakteryzują się trwałością obejmującą zakres zmęczenia gigacyklowego (VHCF). W związku z tym konieczne jest określenie właściwości zmęczeniowych w tym obszarze [3]–[5].



Rys. 1. Ultrasoniczny system do badań zmęczeniowych Italsigma MU26

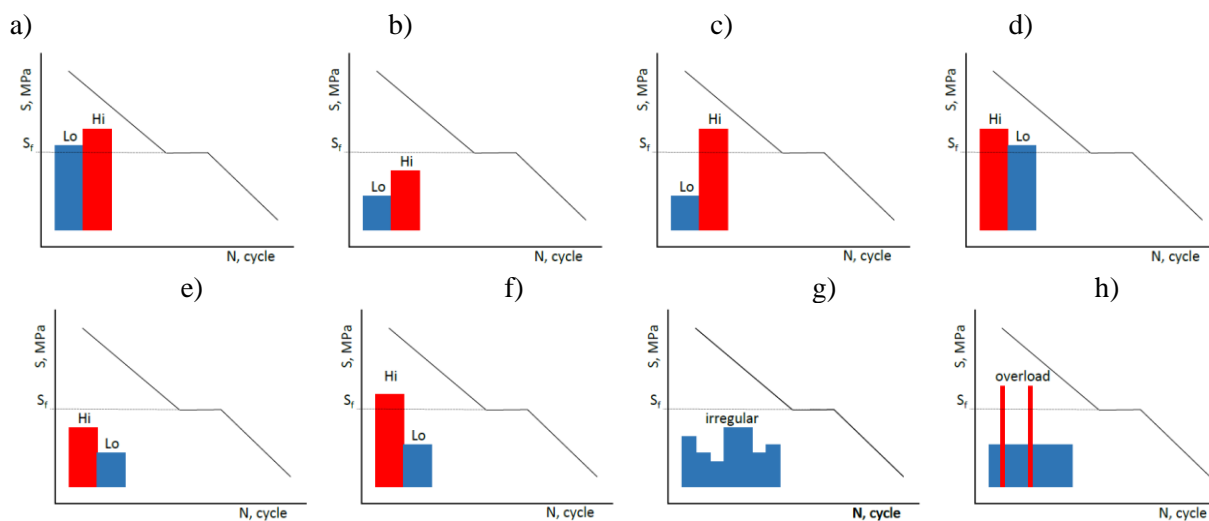
## 2. BADANIA

Badaniom poddano próbki wykonane ze stali niestopowej konstrukcyjnej S355J2+N, dla której wyznaczono podstawowe własności wytrzymałościowe:  $R_{eH} = 498$  MPa,  $R_{eL} = 400$  MPa,  $R_m = 655$  MPa,  $E = 197\,265$  MPa,  $\nu = 0,27$ . Z wykorzystaniem oprogramowania MES zaprojektowano próbki do ultrasonicznych badań zmęczeniowych (rys. 2) o częstotliwości rezonansowej  $20\text{ kHz} \pm 500\text{ Hz}$ . Podczas badań próbki chłodzono powietrzem i w miejscu występowania największych naprężeń rejestrowano temperaturę za pomocą pirometru optris CTlaser LT CF1.



Rys. 2. Wymiary próbek zastosowanych w badaniach zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe przeprowadzono dla osiowego rozciągania–ściskania o współczynniku asymetrii cyklu ( $R = -1$ ). Obejmowały one wyznaczenie granicy zmęczenia metodą Staircase, badania stałoamplitudowe przy obciążeniu powyżej oraz poniżej granicy zmęczenia oraz badania programowane uwzględniające różne warianty obciążeń (rys. 3). Przełomy próbek poddano analizie fraktograficznej. Wyniki badań zmęczeniowych, charakter przełomów zmęczeniowych oraz przeprowadzone analizy omówione zostaną w trakcie konferencji.



Rys. 3. Warianty obciążeń badań zmiennoamplitudowych

## BIBLIOGRAFIA

- [1] KOCANDA S., SZALA J., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa 1997.
- [2] SZALA J., *Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych*, Wydaw. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1998.
- [3] SWACHA P., LIPSKI A., *Cracking of S355J2+N Steel in the High-Cycle and Very-High-Cycle Fatigue Regimes*, Int. J. Fatigue, Mar. 2023, p. 107388.
- [4] KLUSÁK J., SEITL S., *Very high cycle fatigue tests of high strength steels S355 J0 and S355 J2*, Procedia Struct. Integr., 2019, Vol. 17, pp. 576–581.
- [5] KLUSÁK J., HORNÍK V., LESIUK G., SEITL S., *Comparison of high- and low-frequency fatigue properties of structural steels S355J0 and S355J2*, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., Nov. 2021, Vol. 44, No. 11, pp. 3202–3213.

---

## ANALIZA PORÓWNAWCZA WYTRZYMAŁOŚCI TAŚM WSPINACZKOWYCH – WYKONANYCH Z PA I UHMWPE

Agnieszka SZUST, Anna WYBRANIEC, Kamil CIĘŻKI

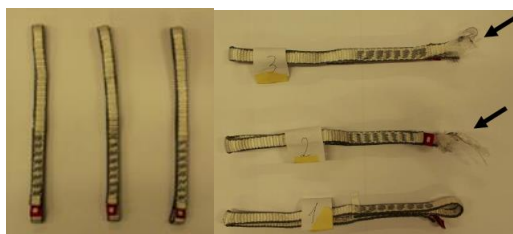
Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej

**Kontakt:** agnieszka.szust@pwr.edu.pl Agnieszka SZUST1, Anna WYBRANIEC1, Kamil CIĘŻKI1

**Słowa kluczowe:** taśmy wspinaczkowe, ekspresy wspinaczkowe, wytrzymałość tworzyw sztucznych PA, UHMWPE

W przedstawionej pracy opisano badania wytrzymałościowe, porównawcze, taśm i pętli wykonanych z tworzyw sztucznych użytkowanych we wspinaczce sportowej oraz górskiej.

Przeprowadzono badania doświadczalne mające na celu analizę wpływu okresu użytkowania oraz czynników środowiskowych na spadek wytrzymałości taśm i pętli zszywanych. Badane elementy były wykonane z materiałów: Dyneema/Spectra/Dynex (polietylen o ultradużej masie cząsteczkowej – UHMWPE) oraz nylon (Poliamid-PA) (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Próbkki Dyneema: nowe i po próbie



Rys. 2. Próbkki nylonowe: nowe i po próbie

Analizie doświadczalnej poddano taśmy użytkowane zarówno na sztucznych ściankach, jak i w środowisku zewnętrznym – górskim. Porównawczo przebadano również analogiczne taśmy nowe: nylon i Dyneema. Oprócz grupy kontrolnej złożonej z taśm nowych, badaniom poddano taśmy nowe przechowywane w niskiej temperaturze:  $-200^{\circ}\text{C}$ , oraz taśmy nowe poddane działaniu mokrej gleby, tak by wyraźnie wniknęła w strukturę przepłotu. Wszystkie próbki (taśmy przyjęte do badań) poddano statycznej próbie rozciągania zgodnie z obowiązującą normą dotycząca badań taśm i pętli wspinaczkowych [1].

Badania zarówno opisane w literaturze [2, 3], jak i własne autorów wskazują, na konieczność wyeliminowania z użytkowania taśm, jeżeli ich wygląd budzi jakiegokolwiek zastrzeżenia. Taśmy, które powinny być bezwzględnie wyeliminowane to te z widocznymi uszkodzeniami mechanicznymi zarówno materiału rodzimego jak i szycia. Ale również eliminacji powinny podlegać taśmy z widocznymi zmechaczeniami powierzchni, mocno zużyte o czym może świadczyć znaczna sztywność materiału (spowodowana drobkami ziemi i/lub magnezji). Podobnie należy postąpić z taśmami nowymi, jeżeli ich data

---

produkcji jest starsza niż 5 lat lub były narażone na promieniowanie UV, lub inne niesprzyjające warunki atmosferyczne.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 566:2017-06. *Sprzęt alpinistyczny – Pętle – Wymagania i metody babań.*
- [2] SCHUBERT P., *Bezpieczeństwo i ryzyko w skale i lodzie. Tom III. Sklep podróżnika*, 2015.
- [3] JANOTTE J., HUMMEL Ch., HELLBERG F., *Careful what you trust – the aging of sling materia*, German Alpine Club.

---

# COMPARISON OF THE FATIGUE BEHAVIOUR OF WROUGHT AND ADDITIVELY MANUFACTURED 316L AUSTENITIC STEEL

Janusz TORZEWSKI, Janusz KLUCZYŃSKI, Krzysztof GRZELAK, Marcin WACHOWSKI

<sup>1</sup> The Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Robots & Machine Design,  
2 Gen. S. Kaliskiego St., 00-908 Warsaw 49, Poland

**Contact:** janusz.torzewski@wat.edu.pl

**Keywords:** 316L austenitic steel, additive manufacturing, selective laser melting, fatigue properties, low cycle fatigue

## INTRODUCTION

The usage of 316L steel in the research related to AM is widespread due to the increased weldability of this steel compared to typical AISI 316 steel. Because AM gives significant possibilities for design freedom, it is essential to provide all necessary data about the performance properties of the parts. Such an approach is critical in the case of using topological optimization [1], [2], especially since many databases of such kind of software take into account the properties and characteristics of conventionally made materials in the computational algorithms. It is also crucial to provide more data about the material behaviour during low-cycle fatigue (LCF) which is very important due to the dynamic fracture course in that kind of loading [3], [4]. Moreover, each AM technology has its specifications for AISI 316L steel mainly related to the specific defects related to each technology type (i.e., powder bed fusion, direct energy deposition, etc.).

This study compares the LCF of a conventionally made material (cold-drawn steel bar) with AM samples produced comparably-exposure in the horizontal direction and machining to obtain the final shape of the samples. All tests were performed on cylindrical samples with the same roughness parameters, which ensured that fatigue tests were carried out in comparable conditions. This approach and fracture analysis provided data on differences and similarities between conventional and additively manufactured parts under strain-based fatigue conditions.

## MATERIAL AND SAMPLES PREPARATION

The tested material was stainless steel 316L (1.4404) produced by two techniques: rolling and selective laser melting. The 316L steel powder and conventionally made (CM) nominal chemical composition and basic mechanical properties are presented in Tables 1 and 2, respectively.

Table 1. Chemical composition of the 316L steel powder and CM material used in the current study (wt. %) [22]

Element	Fe	C	Cr	Cu	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si
Conventionally made	Bal.	0.015	17.4	0.14	1.6	2.31	0.095	10.5	0.025	0.007	0.77
Gas atomized	Bal.	0.027	17.8	0.02	0.98	2.4	0.090	12.8	0.011	0.004	0.72

Table 2. Strength properties of the materials used in the tests according to own research

	Tensile strength [MPa]	0.2% yield strength [MPa]	Elongation [%]
Wrought manufactured	728 ±17.8	574 ±2.4	34 ±1.1
Additively manufactured	637 ±21.9	498 ±25.2	43 ±1.1



CM test parts were produced using commercially available cold-drawn steel bars to ensure the loading direction parallel to the drawing direction. The SLM 125HL system (SLM Solutions AG, Lubeck, Germany) was used for AM samples. During the AM process, the parts were arranged to guarantee similar loading conditions as in CM samples – loading direction parallel to exposure direction. The geometry of the samples used for the low cycle fatigue (LCF) test was prepared following the guidelines of the ISO standard 12106:2017.

All LCF tests were performed on the same cylindrical sample geometry mounted on an Instron 8802 System servo-hydraulic machine. This system was equipped with a 250 kN load cell and a dynamic extensometer (Instron model 2620-603) with a gauge length of 25 mm (measuring range  $\pm 1$  mm). The LCF tests were carried out in the strain control mode, where a sinusoidal waveform at full inversion ratio  $R = -1$  was used. Fatigue tests were carried out at five different strain levels, i.e. 0.35%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.8%.

## RESULTS

In this paper, both the cyclic response and the fatigue life of wrought and additively manufactured 316L were compared using the LCF test. An overview of the cyclic response for different strain amplitudes throughout the LCF test run is shown in Fig. 1 as a graph of the stress amplitude versus the number of cycles for each tested strain amplitude.

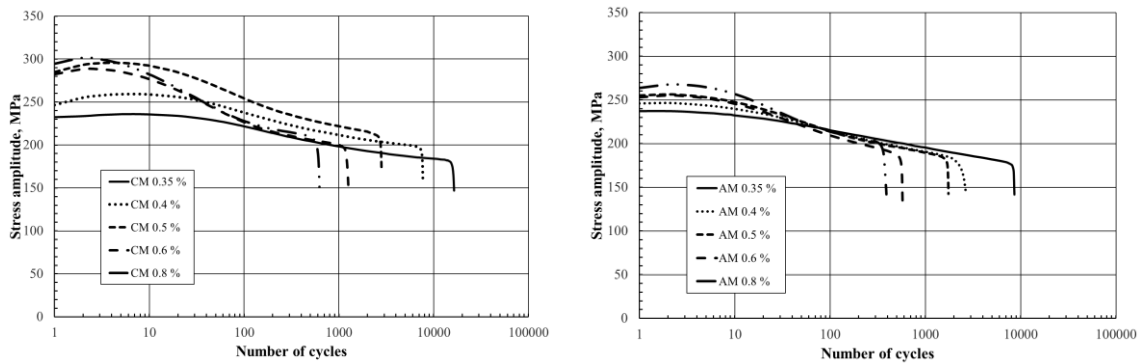


Fig. 1. Variation of stress amplitude for each test for the tested samples from wrought manufactured (a) and additive produced (b).

Figure 1a shows that the softening rate decreases as the number of cycles increases, but the material does not reach a “stabilized” state. The combination of all tested deformation amplitudes (Fig. 5 b) indicates an almost stable beginning of the deformation process for the first few load cycles, except for the highest deformation amplitude. All tested samples showed cyclic weakening above ten load cycles. The difference in the behavior of the materials may be related to the differences resulting from the non-uniformity of stresses and microstructure resulting from the manufacturing process.

The tests enabled the preparation of Ramberg–Osgood cyclic curves, which were made based on parameters obtained as a result of linear regression, taking into account the stress and plastic strain amplitude values at half the number of cycles to failure. The estimated parameters of the native material were  $K' = 704$  MPa and  $n' = 0.0928$  and of the additively produced material  $K' = 578$  MPa and  $n' = 0.0691$ . The obtained data were used to perform a fatigue analysis based on the Manson–Coffin–Basquin relationship. The M-C-B curves have a very similar course for both considered material production methods. The intersection of the elastic and plastic curves in both cases occurred below a hundred cycles, which proves the dominance of elastic deformations during the fatigue life. Fractographic analysis of fatigue fractures revealed more details about the cracking character of the tested samples.

---

## REFERENCES

- [1] GARDAN N., SCHNEIDER A., GARDAN J., *Material and process characterization for coupling topological optimization to additive manufacturing*, *Comput. Aided. Des. Appl.*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 39–49, doi: 10.1080/16864360.2015.1059192.
- [2] XU B., HAN Y., ZHAO L., XIE Y.M., *Topological optimization of continuum structures for additive manufacturing considering thin feature and support structure constraints*, *Eng. Optim.*, 2021, Vol. 53, No. 12, pp. 2122–2143, doi: 10.1080/0305215X.2020.1849170.
- [3] ZHAO X., *Fatigue properties of 316L stainless steel*, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 204–208, pp. 3786–3789, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3786.
- [4] JIN D., TIAN D.J., LI J.H., SAKANE M., *Low-cycle fatigue of 316L stainless steel under proportional and nonproportional loadings*, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2016, Vol. 39, No. 7, pp. 850–858, doi: 10.1111/ffe.12399

---

## **X-RAY DIFFRACTION IN RESEARCH AND IN PRODUCTION QUALITY CONTROL**

Andrzej S. WOJTAS

PROTO Manufacturing Europe and METLAB

**Keywords:** X-ray, heat treatment, surface engineering techniques

The need to construct ever-lighter, more powerful and more fuel-efficient engines forces the constructors and technologists to push the envelope of material constraints by using advanced heat treatment and surface engineering techniques. Engine components are leaned, their surfaces are case carburized, nitrided and hardened, shot peened and superfinished. These special processes must be controlled. The final product specifications set out the upper limit of retained Austenite and the required level and depth of compressive residual stresses. Thanks to the close cooperation between constructors, technologists and metallurgists during the last 50 years, the power of a jet engine has increased almost tenfold while maintaining its weight. It is therefore evident that all its components are subjected to high loads and thus their production process as well as their quality must be carefully monitored.

X-ray diffractometers are used in all branches of automotive and aerospace industries to measure surface residual stresses, evaluate retained Austenite content or surface Nitriding. PROTO Manufacturing is a Canadian company with over 40 years' experience and a product base of over 20 types of X-ray diffractometers. METLAB is the largest commercial XRD laboratory in Poland offering residual stress measurements to numerous aerospace- and automotive companies in entire Europe.

---

## ANALIZA MECHANIZMÓW USZKODZEŃ KARABINKÓW W ASPEKTCIE MONITOROWANIA PROCESU PRODUKCJI

Agnieszka SZUST<sup>1</sup>, Joanna WIŚNIEWSKA<sup>1</sup>, Andrzej ŻAK<sup>2</sup>, Anna WYBRANIEC<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<sup>2</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

**Kontakt:** anna.wybraniec@pwr.edu.pl

**Słowa kluczowe:** karabinek wspinaczkowy, HMS, pęknięcie karabinku

Karabinki są łącznikami używanymi najczęściej do czynności związanych z mocowaniem lin w dziedzinach, takich jak alpinizm, speleologia, żeglarstwo, pożarnictwo, transport, prace na wysokości, turystyka czy ogrodnictwo. Ich głównym zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa i niezawodności tworzonych połączeń użytkownikowi. Służą do wpinania się do stanowisk asekuracyjnych oraz transportowania sprzętu. We wspinaczce karabinki są podstawowymi elementami ekwipunku. Osoba wspinająca się zmuszona jest unieść ze sobą wszystkie karabinki przewidziane na daną trasę. Szacuje się, że to ponad 40 karabinków na trasę 45 m. W celu zwiększenia możliwości wspinacza i ułatwienia pokonywanej trasy, masę karabinków zaczęto redukować poprzez modyfikację konstrukcji, przez zmianę kształtu przekrojów poprzecznych korpusu, zmniejszenie wielkości karabinków czy ulepszenie materiału. Modyfikacje musiały mieć na uwadze zachowanie ich funkcjonalność. Największe korzyści przyniosła zmiana materiału ze stali na stopy aluminium. Był to przełomowy moment w stosowaniu karabinków we wspinaczce.

Obecnie karabinki są wytwarzane w znacznej mierze ze stopów aluminium serii 7000, gdzie głównymi dodatkami są cynk i magnez. Owa seria przeznaczona jest do silnie obciążonych elementów konstrukcji. Szczególnie ważny jest stop 7075-T6. To właśnie z niego produkuje się korpusy, ramiona i nakrętki karabinków, gdyż o odpowiedniej obróbce cieplnej zyskuje najwyższą wytrzymałość wśród stopów aluminium. Jedną z nielicznych jego wad jest przeciętna odporność na korozję, dlatego wyroby z tego stopu są poddawane obróbce galwanicznej, która zabezpiecza je przed szkodliwym wpływem środowiska o dużej wilgotności.

Badaniom poddano 5 karabinków HMS: Mammut Bionic Mythos, Petzl Attache, Simond Rocky, Mammut Crag Twist Lock+, Climbing Technology Snappy. Zakres badań obejmował: badania wytrzymałościowe przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN 12275:2013-09, analizę obszaru pęknięcia, analizę chemiczną, oraz pomiar twardości karabinków.

Obserwacje karabinków po badaniach wytrzymałościowych wykazały, że miejscami uszkodzeń są otwory w dolnej części korpusu lub boczne części ramienia o najmniejszym przekroju, zamykające zamek. Przełomy po zniszczeniu były w znacznej mierze kruche, jedynie w karabinkach: Mammut Bionic Mythos, Mammut Crag Twist Lock+ i Climbing Technology Snappy można zauważyć niewielkie obszary płynięcia plastycznego. Najkorzystniejszym rozmiarem i rozmieszczeniem wydzieleni oraz największą twardością cechował się karabinek Climbing Technology Snappy. Najbardziej zróżnicowane właściwości takie jak: twardość, rozmieszczenie wydzieleni miał karabinek Mammut Bionic Mythos, jest to prawdopodobnie spowodowane obróbką po procesie kucia dla tego elementu.

Głównie skupiono się na analizie mikrostruktur stopów, z których zostały wytworzone karabinki, w celu określenia potencjalnych przyczyn zniszczenia podczas badań wytrzymałościowych. Na podstawie otrzymanych wyników zaproponowano, zamiast tradycyjnej obróbki umacniającej (wytworzenie roztworu – przesycanie – starzenie), obróbkę cieplną ze starzeniem dwustopniowym, podczas której poprawie uległo umocnienie, plastyczność stopu oraz odporność na pękanie naprężeniowo-korozyjne.

---

Dzięki temu można uzyskać lepsze parametry użytkowe oraz zwiększenie bezpieczeństwa podczas używania karabinków. Powyższa obróbka nie jest jednak stosowana w przemyśle ze względu na wydłużenie czasu produkcji, a co za tym idzie – kosztów produkowanego wyrobu.

Przeprowadzona analiza dowodzi, jak duży mają w sobie potencjał konstrukcyjne stopy aluminium oraz jak słabo jest w przemyśle rozwinięta świadomość możliwości kształtowania właściwości tych stopów przez zastosowanie właściwego procesu wytwarzania.

---

## PROBABILISTIC FATIGUE ASSESSMENT UNDER NOTCH AND SIZE EFFECTS

Shun-Peng ZHU

University of Electronic Science and Technology of China, China

**Contact:** zspeng2007@uestc.edu.cn

**Keywords:** probabilistic fatigue modelling, notch fatigue analysis

Fatigue is one of the most encountered problems with dynamically loaded engineering structures. Initially, to ensure the fatigue damage evolution during operation under perfect control, accurate lifing models by abundant experiments and full understanding of fatigue mechanism have been developed, ensuring that the designed structures with sufficient fatigue strength under predefined service condition. Numerous theories and approaches have been developed to address both notch and size effects in metal fatigue as well as damage modelling and life predictions, which aim to provide theoretical support for structural optimal design and integrity evaluation. This speech recalls recent developments and achievements in probabilistic fatigue modelling and analysis of metals under notch and size effects. In particular, recent commonly used methods for fatigue evaluation of metallic notched parts under size effect are summarized and elaborated, including local stress–strain approaches, and critical distance theories as well as weighting control parameters-based approaches, which intend to provide a reference for further research on notch fatigue analysis and promote the integration and/or development among different approaches for practice.

---

# FATIGUE BEHAVIOR OF COMPOSITE REBARS FOR CONCRETE REINFORCEMENT BASED ON EXPERIMENTAL STUDIES

Paweł ZIELONKA, Grzegorz LESIUK, Szymon DUDA, Michał SMOLNICKI,  
Paweł STABLA, Joanna WARYCHA

Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław, Poland

**Contact:** pawel.zielonka@pwr.edu.pl

**Keywords:** composite rebars, pultrusion, fatigue behavior

Development of the composite structures in various industrial areas requires increased knowledge of mechanical aspects such as fatigue strength, resistance of environmental conditions or damage evolution to achieve long term service of the components. Composite rebars for concrete reinforcements are one of the applications, which increased use are noticed in previous years. The advantages of this solution compared to steel counterparts are corrosion resistance, higher specific tensile strength, insensitive to the penetration of electromagnetic waves or low thermal conductivity. These features reduce maintenance cost and increase the life of the structures. The demanding issue of the fatigue performance of composite structures are the progressive accumulation of the matrix cracks and brittle fracture of the components. Hybridization techniques are used to overcome these challenges to increase fatigue strength and achieve pseudo-ductility effect to improve structural safety.

The experimental investigation of fatigue performance for various unidirectional composite structures was carried out to develop knowledge and design the optimal configuration for the specified application. The specimens were manufactured using a modified pultrusion process in the WUST laboratory. As the outcome of the technological part, several types of rebars were taken to further analysis. Obtained configurations were compared with each other to draw conclusions about influence of the technology and microstructure to fatigue strength of the rebars. Each set of the specimens were examined with two stress ratios to evaluate impact of the parameter to fatigue strength. The results will be presented using fatigue prediction models for unidirectional composite structure, which principal approaches will be highlighted. The microstructure of the smooth rebar and the S-N fatigue curve are presented in Fig. 1.

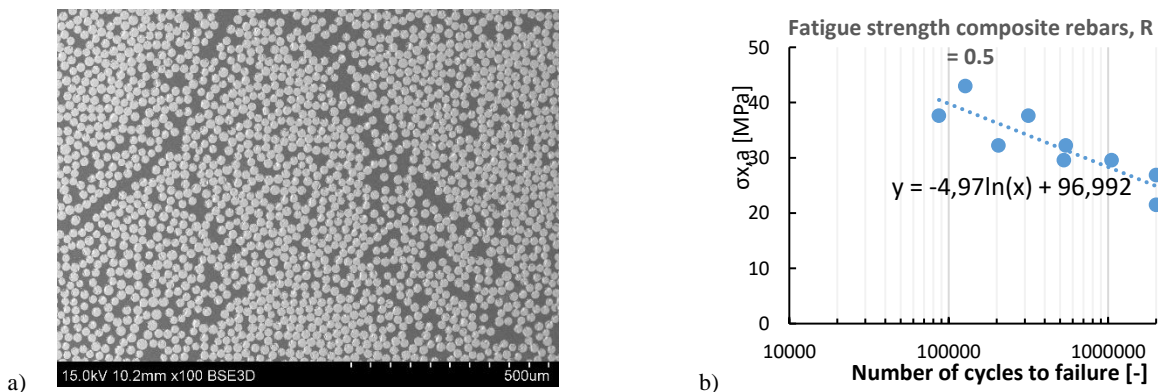


Fig. 1. a) Microstructure of composite rebars with glass fibre reinforcement;  
b) Fatigue curve of the threaded composite rods with stress ratio  $R = 0.5$

---

# UNDERSTANDING THE RELATIONSHIP BETWEEN PORE FEATURES AND FATIGUE BEHAVIOUR IN ALSi7MG0.6 ALLOY FABRICATED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Grzegorz ZIÓŁKOWSKI<sup>1</sup>, Iryna SMOLINA<sup>1</sup>, Emilia GROCHOWSKA<sup>1</sup>,  
Andrzej PAWLAK<sup>1</sup>, Karol KOBIELA<sup>1</sup>, Konrad GRUBER<sup>1</sup>, Matthias ZIEGENHORN<sup>2</sup>,  
Robert ROSZAK<sup>2,3</sup>, Daniela SCHOB<sup>2</sup>, Lukas RICHTER<sup>2</sup>, Philipp MAASCH<sup>2</sup>,  
Tomasz KURZYNOWSKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre for Advanced Manufacturing Technologies (CAMT-FPC), Faculty of Mechanical Engineering,  
Wrocław University of Science and Technology, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

<sup>2</sup> Chair of Engineering mechanics and machine dynamics, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg,  
Senftenberg, Germany

<sup>3</sup> Institute of Applied Mechanics, Poznan University of Technology, Poznań, Poland

**Contact:** grzegorz.ziolkowski@pwr.edu.pl

**Key words:** X-ray Computed Tomography (XCT), pore features, fatigue behaviour, ALSi7Mg0.6 alloy

The ability to detect pores in a non-destructive way using X-ray Computed Tomography (XCT) creates many research opportunities and allows for a deeper understanding of the materials behavior under the influence of loading forces. The correlation between the porosity value and the strength of the tested samples makes it possible to predict the future behavior of materials, which is particularly important for additive technologies (AM) where porosity is a factor inherent in the manufacturing process [1]. The use of *in situ* XCT tests allows for the analysis of pore behavior during static tension or compression tests in real time [2]. On the other hand, *ex-situ* XCT tests (Fig. 1) enable the analysis of pore behavior during fatigue tests [3], where the XCT method has significant advantages over standard metallographic tests [4].

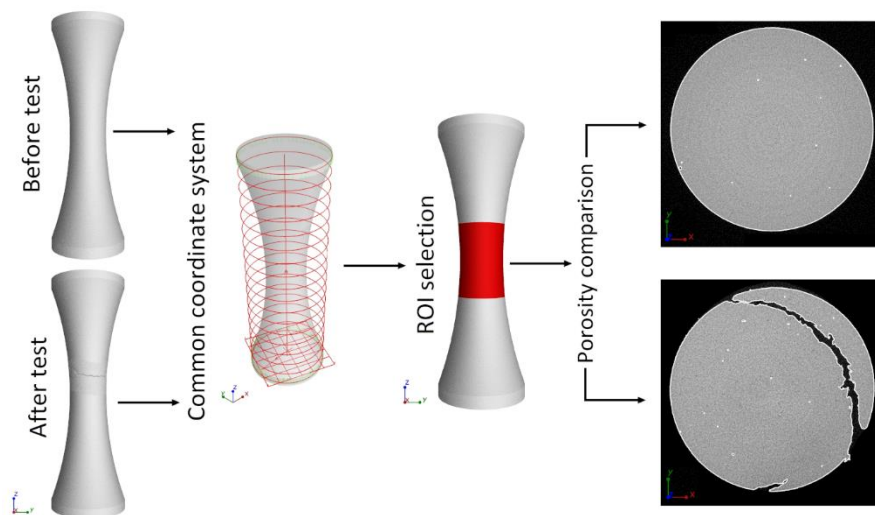


Fig. 1. *Ex-situ* XCT for fatigue testing

The main advantages of using the XCT method include the possibility of three-dimensional evaluation of pores, taking into account their size, shape, morphology and position [5]. However, in order to



---

avoid oversimplifying the geometry of the recorded pores, the resolution of the XCT test should be properly selected so that the accuracy of the recorded geometry is sufficient [6].

Therefore, in this work, high-resolution XCT analysis was performed on AlSi7Mg0.6 samples produced with Laser Powder Bed Fusion (LPBF) technology. The AlSi7Mg0.6 alloy is gaining more and more interest in the AM industry [7], however, its processing with the LPBF method is associated with typical problems occurring in powder bed technology in the form of different types of pores like lack of fusion or gas pores. The *ex-situ* XCT tests were carried out for samples before the fatigue test and either a certain number of cycles or fracture. This made it possible to evaluate changes in pore morphology during fatigue tests and to determine the pores responsible for crack initiation. The tomographic observation was supplemented with a microscopic analysis of the fractures.

The obtained results allowed for the evaluation and better understanding of pore behavior during fatigue tests. Three-dimensional high-resolution pore models can be used to locally evaluate the response of the material in the micro scale, allowing for the analysis of deformation occurring around real pores. The quantitative description of defects presented in this work leads to the complement of linking micromechanical models with continuum mechanical models to describe the fatigue phenomenon, increasing their accuracy in predicting the behaviour of parts manufactured with additive technologies, among others.

#### ACKNOWLEDGMENT

NAWA Programme Grant 07PB/000423 “*Application of functional high-resolution computed tomography in numerical simulations and mechanical tests of additively manufactured aluminum alloys*”.

NCBR Programme Grant TECHMATSTRATEG-III/0044/2019 “*Bionic lightweight Additively Manufactured structural nodes for Automotive industry*”.

#### REFERENCES

- [1] ZIÓLKOWSKI G., CHLEBUS E., SZYMCZYK P., KURZAC J., *Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, Vol. 14, 608–614.
- [2] ZIÓLKOWSKI G., TRETER G., TOKARCZYK E., SZYMCZYK-ZIÓLKOWSKA P., *New possibilities for in situ CT analysis of additive manufactured samples*, Technical Transactions, 2020, e2020028.
- [3] ROMALI B., XIANG Z., MUHAMMAD S., ABDULLAH A.M., MUSTAFA A., FRANK W., ABDUL K.S., *Interrupted fatigue testing with periodic tomography to monitor porosity defects in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V*, Additive Manufacturing, 2019, Vol. 28, 517–527.
- [4] ROMANO S., ABEL A., GUMPINGER J., BRANDÃO A.D., BERETTA S., *Quality control of AlSi10Mg produced by SLM: Metallography versus CT scans for critical defect size assessment*, Additive Manufacturing, 2019, Vol. 28, 394–405.
- [5] NADOT Y., *Fatigue from Defect: Influence of Size, Type, Position, Morphology and Loading*, International Journal of Fatigue, 2022, Vol. 154, 106531.
- [6] ZIÓLKOWSKI G., GRUBER K., TOKARCZYK E., ROSZAK R., ZIEGENHORN M., *X-ray Computed Tomography for the ex-situ mechanical testing and simulation of additively manufactured IN718 samples*, Additive Manufacturing, 2021, Vol. 45, 102070.
- [7] SMOLINA I., GRUBER K., PAWLAK A., ZIÓLKOWSKI G., GROCHOWSKA E., SCHOB D., KOBIELA K., ROSZAK R., ZIEGENHORN M., KURZYNOWSKI T., *Influence of the AlSi7Mg0.6 Aluminium Alloy Powder Reuse on the Quality and Mechanical Properties of LPBF Samples*, Materials, 2022, Vol. 15, 5019.







Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

<https://www.oficyna.pwr.edu.pl>

Prowadzimy sprzedaż wysyłkową:

<https://ksiegarnia.pwr.edu.pl>

[zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl](mailto:zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl)

ISBN 978-83-7493-255-4