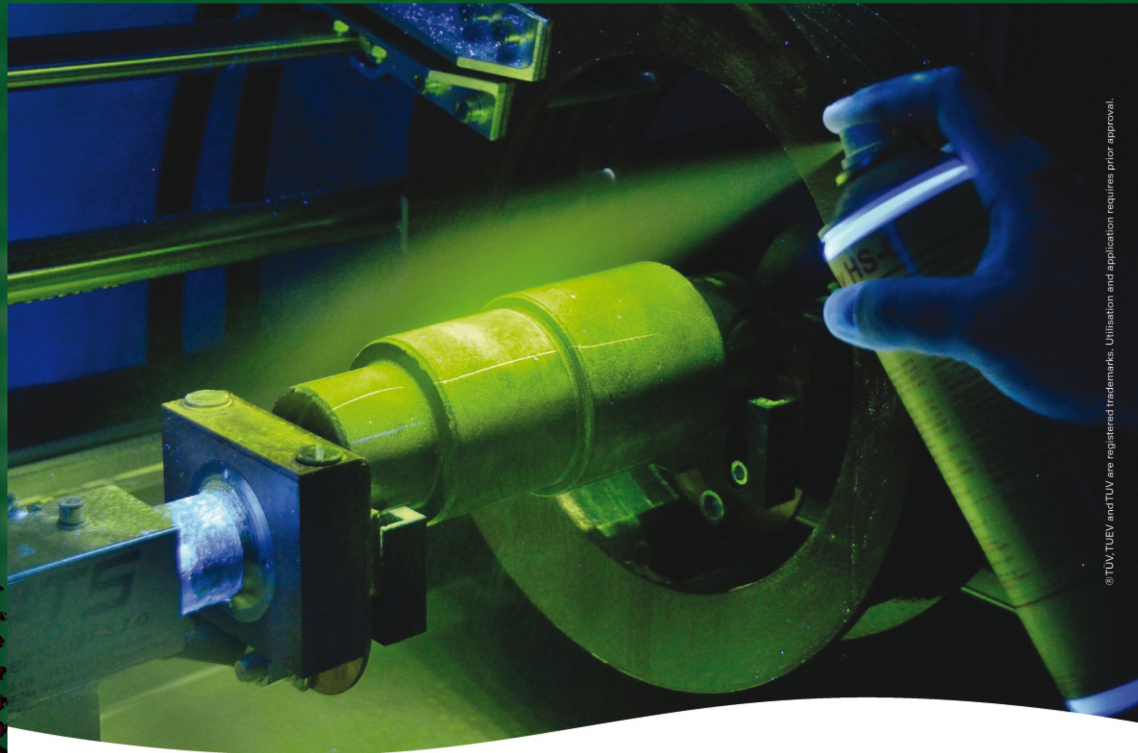


# Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2020 i Diagnostyka

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics



© TÜV, TÜV and TÜV are registered trademarks. Utilisation and application requires prior approval.

Szkolenia, egzaminy  
i certyfikacja personelu NDT



AC 195



**NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!**

[www.tuv.pl](http://www.tuv.pl)

 **TÜVRheinland®**  
Precisely Right.



Badania Nieniszczące i Diagnostyka  
Agenda Wydawnicza SIMP  
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin  
e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl  
www.bnid.pl

## ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

## REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF

Tomasz Chady

## Z-CA REDAKTORA NACZELNEGO DS. NAUKOWYCH /

DEPUTE EDITOR-IN-CHIEF OF SCIENTIFIC AFFAIRS

Jerzy Nowacki

## Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF

Adam Sajek

Ryszard Pakos

## REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

## METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY

Dr Sławomir Mackiewicz, Dr Marek Śliwowski

## CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH

Mgr Bogdan Piekarczyk, Mgr Marta Wojas

## URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ

/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH

Dr Grzegorz Jezierski, Mgr Marek Lipnicki

## PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ

/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH

Dr Krzysztof Dragan, Mgr Darek Wojdała

## DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS

Dr Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA  
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,  
Przewodniczący/President

Prof. Krishnan Balasubramaniam, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India

Prof. Alexander Balitskii, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Prof. Gilmar F. Batalha, University of Sao Paulo, Brasil

Prof. Leonard J. Bond, Iowa State University, USA

Dr Pierre Calmon, CEA, France

Prof. Ermanno Cardelli, Università degli Studi di Perugia, Italy

Prof. Zhenmao Chen, Xi'an Jiaotong University, China

Prof. Leszek A. Dobrzański, World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska

Dr Hubert Drzeniek, AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany

Prof. Antonio Faba, Università degli Studi di Perugia, Italy

Prof. Nikolaos Gouskos, University of Athens, Greece

Mgr Paweł Grześkowiak, UDT, Polska

Prof. Jerzy Hoła, Politechnika Wrocławska, Polska

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, Empa, Switzerland

Mgr Ryszard Jawor, Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska

Dr Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska, Polska

Inż. Sławomir Józwiak, NDT Systems, Polska

Mgr Pablo Katchadjian, National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina

Mgr Jan Kielczyk, Energomontaż-Północ, Polska

Mgr Jacek Kozłowski, TEST PLB, Polska

Prof. Marc Kreutzbruck, University of Stuttgart, Germany

Dr. Jochen Kurz, DB Systemtechnik GmbH, Germany

Mgr Marek Lipnicki, KOLI, Polska

Prof. Leonid M. Lobanow, Paton Welding Institute, Ukraine

Dr Sławomir Mackiewicz, NDT SOFT, Polska

Dr Wojciech Manaj, Instytut Lotnictwa, Polska

Dr Tadeusz Morawski, Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Dr Ryszard Nowicki, GE Energy, Polska

Prof. Mohachiro Oka, Oita National College of Technology, Japan

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, Instytut Kolejnictwa, Polska

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, Instituto Superior Técnico, Portugal

Prof. Joao M A Rebello, Federal University of Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Artur Lopes Ribeiro, Instituto Superior Técnico, Portugal

Prof. Maria Helena Robert, University of Campinas, Brasil

Dr hab. Maciej Roskosz, Politechnika Śląska, Polska

Prof. Leonard Runkiewicz, Instytut Techniki Budowlanej, Polska

Prof. Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska, Polska

Prof. Valentyn R. Skalskyy, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Prof. Jacek Stania, Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Polska

Prof. Jacek Szelażek, IPPT PAN, Polska

Prof. Andrzej Szymański, Politechnika Śląska, Polska

Dr Marek Śliwowski, NDTTEST Warszawa, Polska

Prof. Antonello Tamburrino, University of Cassino and Southern Lazio, Italia

Prof. Yuji Tsuchida, Oita University, Japan

Prof. Andrzej Tytko, AGH Kraków, Polska

Prof. Lalita Udpa, Michigan State University, USA

Prof. Gábor Vértessy, Hungarian Academy of Sciences, Hungary

Dr Grzegorz Wojas, UDT, Polska

Prof. Sławomir Wronka, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Prof. Chunguang Xu, Beijing Institute of Technology, China

Prof. Noritaka Yusa, Tohoku University, Japan

# Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2020

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 5

## SPIS TREŚCI

<b>Redakcja BNiD</b>	
Słowo wstępne .....	2
<b>Dariusz WOJDAŁA</b>	
48. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących .....	5
<b>Gerd DOBMANN</b>	
Quo Vadis NDT? – A Forecast of the Future* .....	6
<b>Tadeusz STEPINSKI</b>	
Badanie kotew kopalnianych przy użyciu fal prowadzonych* .....	18
<b>Bogusław ŁADECKI</b>	
Przedwczesne uszkodzenie zmęczeniowe wału ze stali nierdzewnej gatunku X46Cr13* .....	28
<b>Przemysław ŁOPATO, Michał HERBKO</b>	
Badanie wpływu mechanicznego odkształcenia metapowierzchni bazującej na komplementarnym rezonatorze pierścieniowym na jej właściwości rezonansowe w zakresie mikrofalowym i terahercowym* .....	32
<b>Bogusław ŁADECKI</b>	
Badania diagnostyczne przyczyn awarii wytłaczarki przemysłowej do tworzyw sztucznych $\varnothing 90^*$ .....	38
Informacje dla Autorów i Czytelników .....	42

\* Artykuł recenzowany

## REKLAMY NA OKŁADCE

TÜV Rheinland .....	1
TÜV Rheinland .....	43

## REKLAMY W NUMERZE

49. KKBN .....	4
----------------	---

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA  
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT





Bogusław Ładecki\*

Katedra Wytrzymałości, Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH w Krakowie

# Przedwczesne uszkodzenie zmęczeniowe wału ze stali nierdzewnej gatunku X46Cr13

## Premature fatigue damage to the stainless steel shaft grade X46Cr13

### STRESZCZENIE

W referacie omówiono przypadek przedwczesnego wystąpienia pęknięcia zmęczeniowego wału wykonanego ze stali nierdzewnej gatunku X46Cr13. Przeprowadzone badania wizualne, metalograficzne i pomiary twardości, wykazały występowanie błędów w obróbce termicznej elementu, które nie zostały stwierdzone poprzez wykonanie odpowiednich badań diagnostycznych wału.

**Słowa kluczowe:** Stal nierdzewna; zmęczenie materiału; badania nieniszczące

### ABSTRACT

The paper discusses the case of premature fatigue crack occurrence of a shaft made of stainless steel grade X46Cr13. Visual, metallographic and hardness tests carried out showed the occurrence of errors in the heat treatment of the element, which were not found by performing appropriate shaft diagnostic tests.

**Keywords:** Stainless steel; material fatigue; non-destructive testing

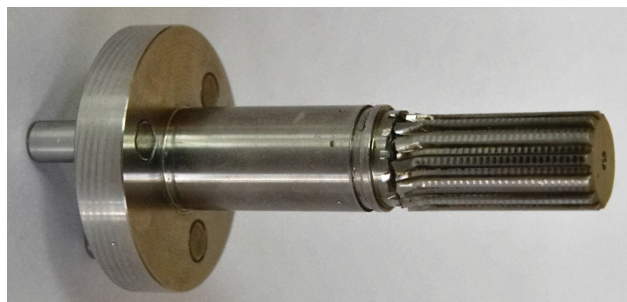
### 1. Wstęp

Stal nierdzewna martenzytyczna gatunku X46Cr13 (1.4034) [1], to wysokostopowa nierdzewna stal chromowa, znajdująca szerokie zastosowanie w przemyśle do wyrobu łożysk tocznych, sprężyn, wałów, narzędzi chirurgicznych, jak również narzędzi: tnących, skrawających, pomiarowych i innych elementów narażonych na ścieranie.

Stal ta charakteryzuje się odpornością na korozję: atmosferyczną, wód naturalnych, z wyjątkiem kopalnianych i morskiej, rozcieńczonych zimnych roztworów soli, niektórych rozcieńczonych zimnych kwasów organicznych i nieorganicznych, benzyny, innych ciekłych paliw, gorących oparów ropy naftowej, olejów, smarów, alkoholi, oraz produktów spożywczych w których składzie nie występuje sól ani inny środek konserwujący [2]. Stal ta nadaje się do wysokiego hartowania, natomiast średnio nadaje się do spawania.

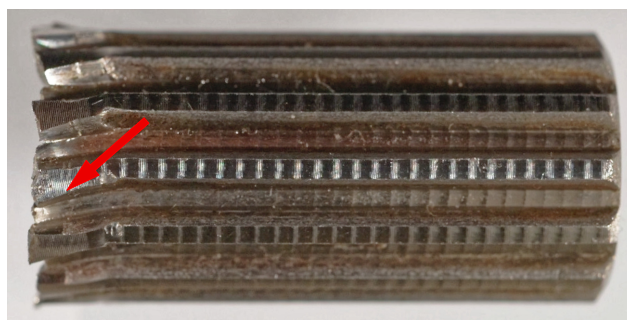
Dla wału z wielowypustem o średnicy 20 mm, podstawie kołowej o średnicy 50 mm, z osadzonymi w niej trzema bolcami o średnicy 10 mm i długości całkowitej 90 mm wykonanego z rozważanej stali, stwierdzono wystąpienie przedwczesnego uszkodzenia zmęczeniowego zilustrowanego na Rys. 1.

Na Rys. 2 i Rys. 3 zilustrowano odpowiednio odłamana część wielowypustu, z widocznymi znacznymi odkształceniami plastycznymi poprzedzającymi pęknięcie na wskroś, oraz przełom części wału z wielowypustem, z widocznymi pęknięciami idącymi od powierzchni dna



Rys. 1. Uszkodzony zmęczeniowo wał z wielowypustem z widocznym przełomem w miejscu przejścia gładkiej powierzchni wału w wielowypust.

Fig. 1. Fatigue-damaged spline shaft with visible fracture at the transition point of the smooth shaft surface into the spline.



Rys. 2. Odłamana część wielowypustu z widocznymi znacznymi odkształceniami plastycznymi poprzedzającymi pęknięcie na wskroś.

Fig. 2. A broken part of the spline with significant plastic deformations preceding the through fracture.

\*Autor korespondencyjny. E-mail: boglad@agh.edu.pl



Rys. 3. Przełom części wału z wielowypustem z widocznymi pęknięciami idącymi od powierzchni dna wpustu prawie do osi wału; widoczne również „zaklepania” powierzchni przełomu.

Fig. 3. The fracture of a part of the shaft with a spline with visible cracks coming from the Surface of the bottom of the inlet almost to the axis of the shaft; also visible „clogging” of the fracture surface.

wpustu prawie do osi wału. Na przełomie widoczne są również „zaklepania” powierzchni, powstałe podczas pracy elementu z zainicjowanym pęknięciem obrączkowym.

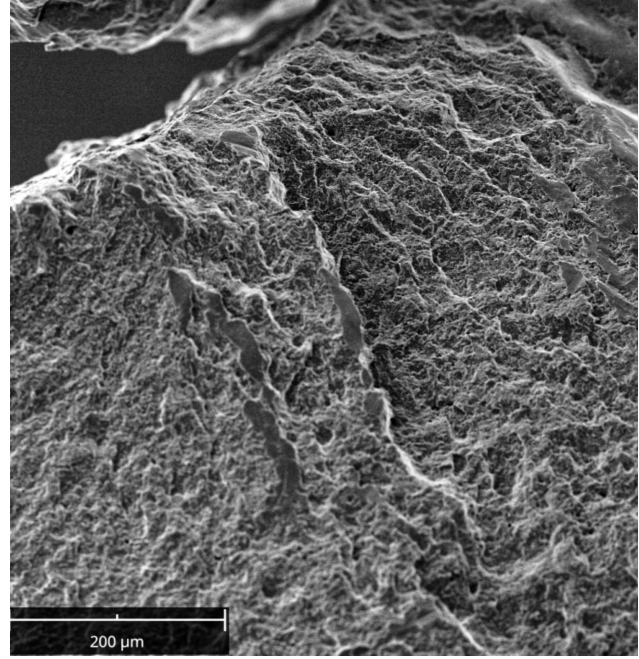
Badania nieniszczące wykonane z wykorzystaniem metody wizualnej wskazują (Rys.2, Rys.3), że dominującymi naprężeniami są naprężenia styczne od skręcania, na co wskazuje charakter dużych trwałych deformacji widocznych na całym obwodzie przełomu, natomiast zginanie daje dodatkową składową naprężeń normalnych o ekstremum w punktach górnym i dolnym wału, którą trudno ilościowo ocenić na podstawie analizy przełomu.

## 2. Badania metalograficzne

Badania fraktograficzne wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego dla przełomu z Rys.3 w obszarze dna wpustu, wykazały występowanie przełomu zmęczeniowego ciągliwego z widocznymi węglkami, oraz powierzchniowymi „zaklepaniami” spowodowanymi wzajemnym ocieraniem obracających się fragmentów wału – Rys.4 [3].

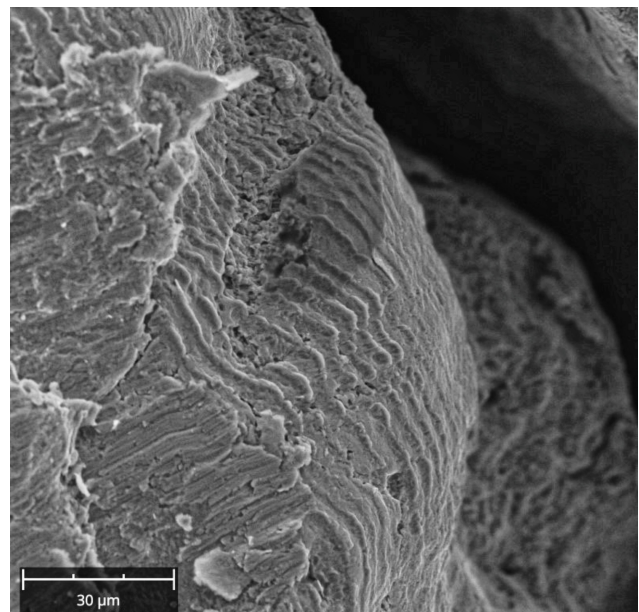
Badania fraktograficzne wykonane w obszarze szczeliny z Rys.3 wykazały występowanie licznych wyraźnych prążków zmęczeniowych – Rys.5, będących liniami zatrzymania propagującego pęknięcia zmęczeniowego [4,5].

Badania mikroskopowe stali wykonane dla wielowypustu zilustrowane na Rys.6 wykazały, że badana stal jest w stanie



Rys. 4. Przełom zmęczeniowy ciągliwy .

Fig. 4. Ductile fatigue breakthrough.

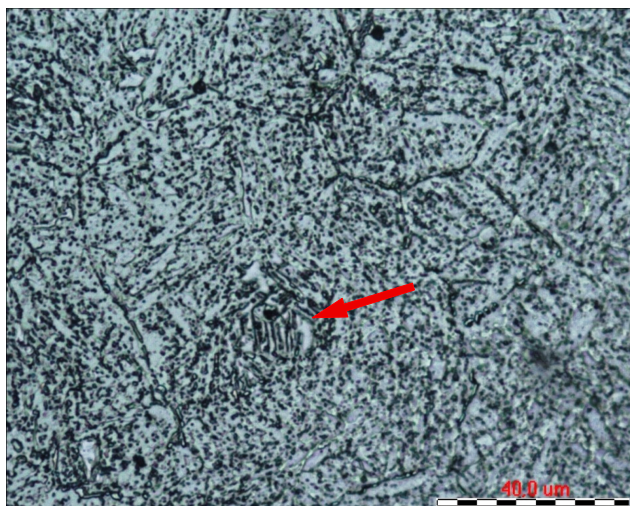


Rys. 5. Dobrze zachowane linie zatrzymań czoła propagującego pęknięcia zmęczeniowego w szczeliny z Rys.3.

Fig. 5. Well-preserved beach marks of a front of propagating fatigue crack in the gap shown in Fig.3.

zmięczonym. Widoczne są granice ziarn, oraz równomiernie rozmieszczone węgliki w osnowie, przy czym stwierdzono obecność śladowych ilości perlitu, co wskazuje że element nie był hartowany i w stanie zmięczonym poddany został obróbce wiórowej.





Rys. 6. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym (obiektyw 50x); strzałka pokazuje obszar śladowych ilości perlitu.

Fig. 6. Microstructure on the cross-section (50x lens); the arrow shows the area of trace of perlite.

### 3. Analiza składu chemicznego i pomiary twardości

Przeprowadzona analiza składu chemicznego rozważanej stali (Tab.1) wykazała nieco niższą zawartość węgla w porównaniu do wartości normowej, co sugerowałoby przypisanie badanemu materiałowi gatunku stali X39Cr13, (nr 1.4031) zgodnie z normą [1], nie odpowiadającego dokładnie projektowemu gatunkowi stali X46Cr13 (1.4034). Na przygotowanej do pomiaru twardości płasko-równoległej płycie, uzyskano średnią twardość ok. 89HRB. Podobną wartość twardości zmierzono na powierzchni czołowej wału. Uzyskana dla wału twardość 89HRB odpowiada twardości 188HV5 (przeliczeniowa wartość twardości Vickersa przy obciążeniu HV5 zg. z wymaganiami normy [6]) i jest znacznie niższa od minimalnej twardości wymaganej po przeprowadzeniu obróbki cieplnej (25-30HRC) dla analizowanego materiału. Twardość - 20HRC odpowiada twardości 266HV5 zg. ze wzmiankowaną normą.

Tab. 1. Skład chemiczny stali.

Tab. 2. Chemical composition of the steel.

	Pierwiastek chemiczny, % mas.						Wynik analizy [1]
	C	Mn	Si	S	P	Cr	
<b>Własna analiza</b>	<b>0,38</b>	<b>0,59</b>	<b>040</b>	<b>0,023</b>	<b>0,021</b>	<b>13,1</b>	<b>X39Cr13</b>
Wg. normy [1]	0,36 ÷ 0,42	<1,0	<1,0	<0,03	<0,04	12,0÷14,0	X39Cr13
Wg normy [1]	0,43 ÷ 0,50	<1,0	<1,0	<0,03	<0,04	12,5÷14,5	X46Cr13

### 4. Podsumowanie

Stal X46Cr13 należy do grupy stali odpornych na korozję martenzytyczną, przeznaczonych do ulepszenia cieplnego, polegającego na nagrzanu stali do temperatury 900 C – 1030 C, a następnie chłodzeniu w oleju. Ulepszenie cieplne to połączenie dwóch zabiegów: hartowania w oleju z zakresu jednorodnego austenitu, a następnie odpuszczania w temperaturze 100 C-200 C. Czas nagrzewania i wytrzymania w poszczególnych zakresach temperatur zależy od grubości obrabianej części [7]. Po takim procesie obróbki termicznej uzyskać można twardość do ok. 50HRC. Mikrostruktura widoczna na rys. 6 wskazuje, że badana stal jest w stanie zmiękczonym. Widoczne są granice ziarn, oraz równomiernie rozmieszczone węgliki w osnowie. Stwierdzono również obecność śladowych ilości perlitu co wskazuje, że element nie był hartowany i w stanie zmiękczonym poddany został obróbce wiórowej.

Zastosowana stal w pełni spełnia wymagania konstrukcyjne przedmiotowego wału. Twardość otrzymanego martenzytu zależy od zawartości węgla rozpuszczonego w austenicie przed hartowaniem w oleju. Czasem odpuszczania i temperaturą wytrzymania można w szerokich granicach regulować twardość.

Dla badanego wału nie zastosowano obróbki cieplnej zwanej ulepszeniem cieplnym, co spowodowało, że nie uzyskano wymaganej twardości 25 – 30 HRC, przewidzianej dla tego elementu konstrukcyjnego wg jego dokumentacji technicznej. Na stan zmiękczony materiału wskazuje niska twardość 89HRB zmierzona w całym przekroju elementu.

Badania mikroskopowe potwierdziły to przypuszczenie. Mikrostruktura składa się z ferrytycznej osnowy z równomiernie rozmieszczonymi węglkami. Daje się zauważyć miejsca z niewielką ilością perlitu co wskazuje, że stal nie była poddana prawidłowej obróbce ulepszenia cieplnego. Niska twardość, a co za tym idzie niska wytrzymałość, były bezpośrednią przyczyną deformacji plastycznych na powierzchni, a w konsekwencji zmęczeniowego zniszczenia wału w obszarze koncentracji naprężeń, na przejściu części walcowej w obszar z wielowypustem (Rys.1).

Wykonanie poprawnie zaplanowanych badań diagnostycznych, polegających na etapie wykonania elementu na przeprowadzeniu kontroli gatunku materiału, jakości przeprowadzenia obróbki termicznej, np. poprzez wykonanie pomiarów twardości, w połączeniu z badaniami nieniszczącymi, wpłynąć może na znaczące obniżenie prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego, a w konsekwencji awarii lub katastrofy, z wszelkimi konsekwencjami prawnymi i finansowymi.

### **Podziękowanie**

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej Katedry Wytrzymałości Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji WIMiR AGH pt. *Wytrzymałość Materiałów i Konstrukcji - praca nr 11.11.130.375.*

### **5. Literatura**

- [1] PN-EN 10088-1: 2014 - Stale odporne na korozję -- Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję.
- [2] <https://www.alfa-tech.com.pl/stale-wysokostopowe-0-specjalnych-wlasnosciach-stal-nierdzewna-4h13>.
- [3] B. Ładecki, T. Skowronek: Analiza przyczyn zniszczenia wału zg. z rys. nr FS D1300S20000-000-02. AGH, KW,ZMiK, praca nie publikowana, Kraków 2019.
- [4] Norman E. Dowling: Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and

Fatigue. Printice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1999.

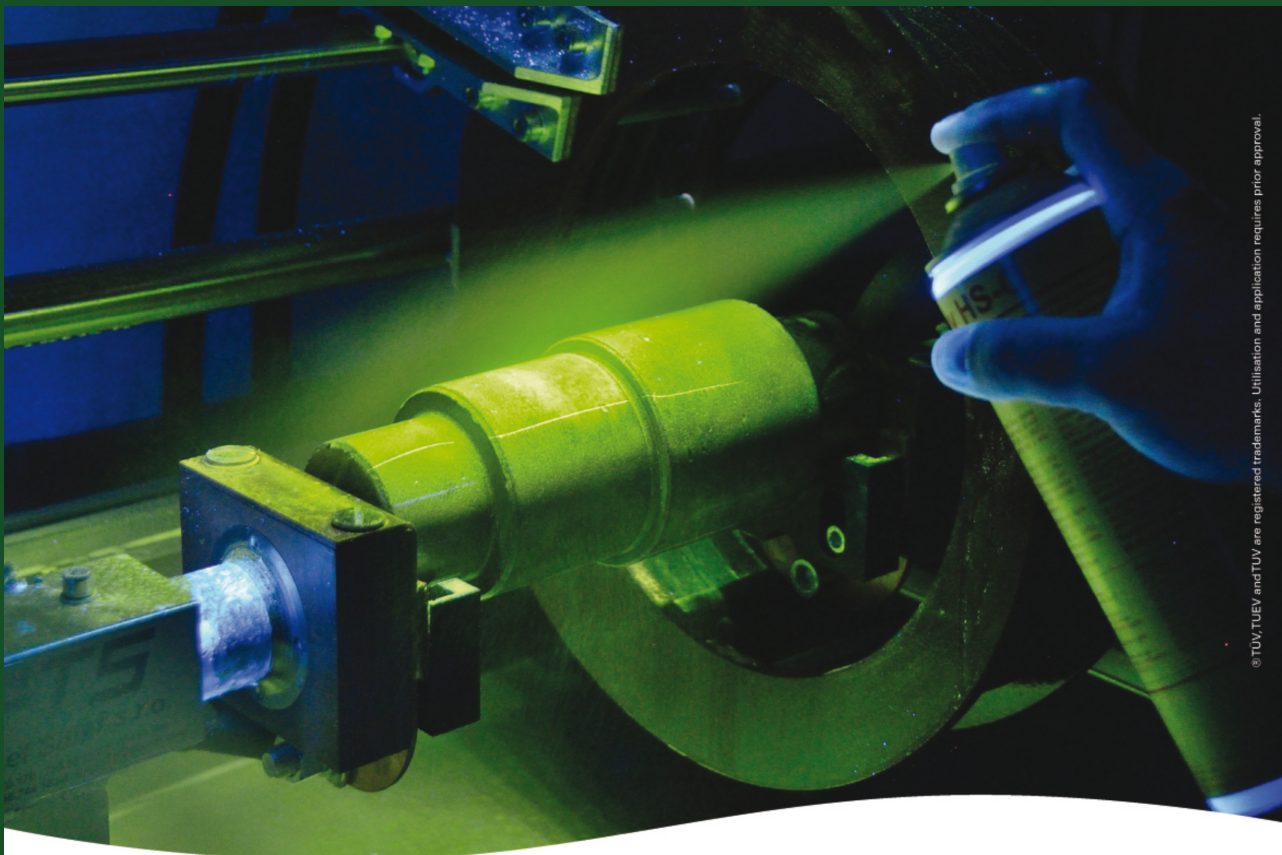
- [5] K. Rykulak: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000.
- [6] PN-93/H-04357: Stal i staliwo. Tablice porównawcze twardości.
- [7] T. Burakowski, T. Wierchoń: Inżynieria powierzchni meali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.



**Dr inż. Bogusław Ładecki**, jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Od wielu lat pełni funkcję Sekretarza Zarządu w Polskim Towarzystwie Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP, jak również funkcję członka Zarządu

Krakowskiego Oddziału SIMP. Jako autor lub współautor prawie stu publikacji naukowo-badawczych, zajmuje się problemami wytrzymałości, zmęczenia, oraz badań nieniszczących materiałów i konstrukcji.





© TÜV, TÜV and TÜV are registered trademarks. Utilisation and application requires prior approval.

## Szkolenia, egzaminy i certyfikacja personelu NDT



AC 195



VT



MT



PT



UT



RT



ET

**NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!**

[www.tuv.pl](http://www.tuv.pl)

 **TÜVRheinland®**  
Precisely Right.