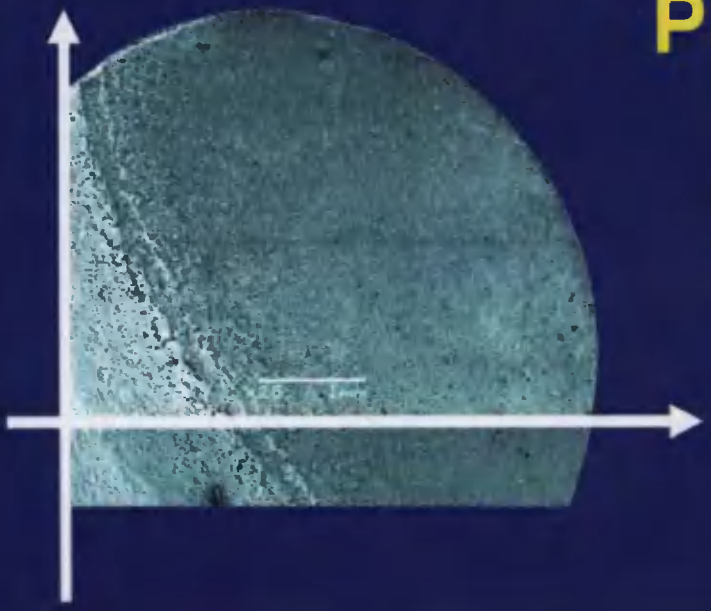
POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET BUDOWY MASZYN

MIĘDZYSEKCYJNY ZESPÓŁ ZMĘCZENIA
I MECHANIKI PĘKANIA
MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI

ZMĘCZENIE I MECHANIKA PĘKANIA

XXIV



3/.6

czenie i mechanika pę

2.

DAWNICTWA UCZELNIANE
TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZEGO
W BYDGOSZCZY
2012

POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET BUDOWY MASZYN

MIĘDZYSEKCYJNY ZESPÓŁ ZMĘCZENIA
I MECHANIKI PĘKANIA
MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI

ZMĘCZENIE I MECHANIKA PĘKANIA

Materiały XXIV Sympozjum
Zmęczenie i Mechanika Pękania

WYDAWNICTWA UCZELNIANE
UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZEGO
2012

ORGANIZATORZY

Polska Akademia Nauk, Komitet Budowy Maszyn
Międzysekcyjny Zespół Zmęczenia i Mechaniki Pękania Materiałów i Konstrukcji
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
w Bydgoszczy, Instytut Mechaniki i Konstrukcji, Zakład Sterowania i Konstrukcji

KOMITET NAUKOWY

prof. dr hab. inż. Józef SZALA – przewodniczący
dr hab. inż. Zdzisław Bogdanowicz, prof. nadzw. WAT
dr hab. inż. Stanisław Bogdański, prof. nadzw. PW
dr hab. inż. Dariusz Boroński, prof. nadzw. UTP
prof. dr hab. inż. Krzysztof Gołoś
prof. dr hab. inż. Czesław Goss
dr hab. inż. Hieronim Jakubczak
dr hab. inż. Jerzy Kaleta, prof. nadzw. PWr
prof. zw. dr hab. inż. Wacław Kasprzak
prof. dr hab. Dorota Kocańda
dr hab. inż. Janusz Kozak, prof. nadzw. PG
prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda
prof. dr hab. inż. Ewald Macha
dr hab. inż. Krzysztof Molski, prof. nadzw. PB
prof. dr hab. inż. Andrzej Neimitz,
prof. dr hab. inż. Tadeusz Niezgodziński
prof. dr hab. inż. Jerzy Okrajni
dr hab. Ihor Rokach, prof. nadzw. PŚk
prof. dr hab. inż. Marek Rybaczuk
prof. dr hab. inż. Janusz Sempruch
prof. dr hab. inż. Andrzej Seweryn
prof. dr hab. inż. Jan Sikora
prof. dr hab. inż. Andrzej Skorupa
prof. dr hab. inż. Małgorzata Skorupa
prof. zw. dr hab. inż. Kazimierz Sobczyk, czł. PAN
dr hab. inż. Wojciech Sobczykiewicz, prof. nadzw. PW
dr hab inż. Lucjan ŚNIEŻEK, prof. nadzw. WAT
prof. dr hab. inż. Tomasz Topoliński
dr hab. inż. Krzysztof Werner, prof. nadzw. PCz

KOMITET ORGANIZACYJNY

prof. dr hab. inż. Janusz Sempruch – przewodniczący
dr inż. Artur Cichański – sekretarz
dr hab. inż. Dariusz Skibicki – redaktor, projekt okładki
dr inż. Krzysztof Nowicki – CD ROM
Zofia Kowalska

Zamieszczone prace zostały zrecenzowane przez członków Komitetu Naukowego

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Redaktor Naczelny prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 374-94-82, 52 374-94-26
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl http://www.wu.utp.edu.pl

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 7,3. Ark. druk. 10,4. Papier druk. kl. III.
Oddano do druku i druk ukończono w maju 2012 r.
ARGONEX S.J., 85-758 Bydgoszcz, ul. Przemysłowa 34

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA 9

Łukasz BLACHA, Aleksander KAROLCZUK
Identyfikacja charakterystyki zmęczeniowej „materiału zastępczego" dla stalowych złączy spawanych 11

Wojciech BŁAŻEJEWSKI, Paweł GĄSIOR, Jerzy KALETA, Radosław RYBCZYŃSKI
Badania zmęczeniowe wysokociśnieniowego zbiornika kompozytowego typu czwartego z programowanymi defektami 13

Zdzisław BOGDANOWICZ, Krzysztof GRZELAK
Pękanie zmęczeniowe przyczyną uszkodzenia elementów silnika spalinowego 15

Dariusz BOROŃSKI
Badanie własności materiałowych z zastosowaniem minipróbek 17

Dariusz BOROŃSKI, Piotr KIEDROWSKI
Badania wpływu spawania światłowodów na ich wytrzymałość mechaniczną 19

Michał BÖHM, Adam NIESŁONY
Przegląd modeli uwzględniających wpływ wartości średniej naprężenia na trwałość w jednoosiowym stanie obciążenia 21

Michał BURAK, Artur CICHAŃSKI, Dariusz SKIBICKI
Analityczna, numeryczna i tensometryczna analiza ram nośnych wozów paszowych EVO 12 23

Łukasz DERPEŃSKI, Andrzej SEWERYN
Bezdotykowy pomiar wydłużenia i kąta skręcenia bazy pomiarowej próbki w badaniach wytrzymałościowych 25

Anna FALKOWSKA, Andrzej SEWERYN
Doświadczalne badania wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej spieków porowatych stali implantacyjnej 316l 27

Jarosław GAŁKIEWICZ
Symulacja próby rozciągania połączenia spawanego typu 1/2V ze stali wysokowytrzymałej (przypadek *undermatching*) 29

Jarosław GAŁKIEWICZ, Tadeusz PAŁA, Ihor DZIOBA
Właściwości mechaniczne złączy spawanych z ultra wysokowytrzymałych stali ferrytycznych 31

Piotr GARBACZ, Wojciech MIZAK
Metoda kalibracji w dwukamerowym systemie wizyjnym do obserwacji procesów zmęczeniowych 33

Tomasz GIESKO
Dwukamerowy system monitorowania procesów zmęczeniowych 35

Grzegorz GOLAŃSKI, Stanisław MROZIŃSKI, Krzysztof WERNER
Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa martenzytycznego staliwa po starzeniu 37

Czesław GOSS, Pawel MARECKI
Badania wytrzymałości zmęczeniowej stali S960QL i jej połączeń spawanych ... 39

Zbigniew GÓRSKI, Jakub KOWALSKI
Propozycja procedur dla Sprawdzania wytrzymałości statycznej i trwałości zmęczeniowej konstrukcji kadłuba statku ... 41

Zbigniew GÓRSKI, Janusz KOZAK
Zagadnienia niszczenia zmęczeniowego konstrukcji kadłuba statku jako element określania poziomu ryzyka w planowaniu eksploatacji statku ... 43

Marcin GRABA
Rozszerzenie koncepcji oceny obciążeń granicznych na przypadki trójwymiarowe dla rozciąganej płyty z centralną szczeliną ... 45

Marcin GRABA
Weryfikacja hybrydowych rozwiązań do oszacowania całki J wg procedur EPRI dla wybranych geometrii ... 47

Volodymyr HUTSAYLYUK, Lucjan ŚNIEŻEK, Mykola CZAUSOW, Andriy PYLYPENKO
Badanie własności mechanicznych stopu aluminium 2024-T3 przy odkształceniu statycznym w warunkach obciążenia złożonego ... 49

Jacek JACKIEWICZ
Modelowanie rozwoju pęknięć w stalach ... 51

Marek JAKUBOWSKI
Korozja wżerowa stali w środowisku morskim oraz współzależność tej korozji i procesu zmęczenia ... 53

Mieczysław JARONIEK, Tadeusz NIEZGODZIŃSKI
Modelowanie pęknięć lamelarnych ... 55

Mieczysław JARONIEK, Tadeusz NIEZGODZIŃSKI
Zastosowanie elastooptyki do badania pęknięć lamelarnych ... 57

Grzegorz JUNAK
Trwałość zmęczeniowa stali 13HMF przy obciążeniach stopniowanych o charakterze małocyklowym ... 59

Jerzy KALETA, Michał KRÓLEWICZ, Daniel LEWANDOWSKI, Michał PRZYBYLSKI
Badania zmęczeniowe elastomerów magnetoreologicznych ... 61

Jerzy KALETA, Daniel LEWANDOWSKI, Rafał MECH
Niejednorodność efektu Villariego w cyklicznie obciążonym kompozycie o gigantycznej magnetostrykcji ... 63

Aleksander KAROLCZUK, Krzysztof KLUGER, Mateusz KOWALSKI, Grzegorz ROBAK
Rozwój pęknięć w bimetalu stal-tytan w próbie cyklicznego rozciągania-ściskania ... 65

Aleksander KAROLCZUK, Krzysztof KLUGER, Mateusz KOWALSKI, Fabian ŻOK, Grzegorz ROBAK
Naprężenia własne w analizie zmęczenia mechanicznego bimetalu stal-tytan otrzymanego w wyniku zgrzewania wybuchowego 67

Andrzej KAZBERUK, Mykhaylo P. SAVRUK, Grzegorz TARASIUK
Koncentracja naprężeń w zaokrąglonych wierzchołkach karbów i otworów w stanie antypłaskim 69

Sylwester KŁYSZ, Janusz LISIECKI, Gabriel GMURCZYK, Piotr REYMER, Andrzej LESKI, Dariusz BOCHENEK, Dariusz ZASADA
Analiza metod uzyskiwania znaczników na powierzchni złomu zmęczeniowego w strukturze płatowca 71

Dorota KOCAŃDA, Volodymyr HUTSAYLYUK, Tomasz ŚLĘZAK, Janusz TORZEWSKI
Prędkość zmęczeniowego pękania stali S235 i S355 po powierzchniowej obróbce tarciowej 73

Dorota KOCAŃDA, Stanisław MROZIŃSKI
Kumulacja energii odkształcenia w stalach konstrukcyjnych S235 i S355 w warunkach niskocyklowego niesymetrycznego obciążenia 75

Janusz KOZAK, Karol NIKLAS
Problemy modelowania numerycznego dla określaniu pola naprężeń w teowym połączeniu spawanym laserowo stalowej konstrukcji typu sandwich 77

Marta KUREK, Krzysztof KLUGER, Tadeusz ŁAGODA
Badania symulacyjne wpływu nierównoległości charakterystyk zmęczeniowych na szacowanie trwałości zmęczeniowej 79

Marta KUREK, Tadeusz ŁAGODA
Trwałość zmęczeniowa w warunkach obciążeń blokowych z uwzględnieniem nierównoległości wzajemnych charakterystyk zmęczeniowych 81

Andrzej KUREK, Adam NIESŁONY
Badania zmęczeniowe bimetalu stal-tytan zgrzewanego metodą wybuchową 83

Andrzej KUREK, Adam NIESŁONY, Robert BAŃSKI
Analiza numeryczna stanu naprężenia w okolicy złącza materiałów platerowanych metodą wybuchową 85

Cyprian T. LACHOWICZ
Metoda identyfikacji pętli histerezy 87

Bogdan LIGAJ, Grzegorz SZALA
Porównanie własności cyklicznych stali C45 w zakresie niskocyklowego zmęczenia w warunkach sterowania naprężeniem i odkształceniem 89

Bogdan LIGAJ, Grzegorz SZALA
Weryfikacja doświadczalna obliczeń trwałości zmęczeniowej stali 41Cr4 dla obciążeń losowych o szerokim widmie 91

Adam LIPSKI, Dariusz BOROŃSKI
Zastosowanie termografii w analizie własności wytrzymałościowych minipróbek ... 93

Adam LIPSKI, Dariusz SKIBICKI
Zmiana temperatury próbki w zależności od charakteru obciążenia wieloosiowego ... 95

Tomasz MARCINIAK, Sławomir BUJNOWSKI, Zbigniew LUTOWSKI, Tomasz GIESKO, Dariusz BOROŃSKI
Zastosowanie cyfrowej korelacji obrazu w analizie zmęczeniowego pękania ... 97

Tomasz MARCINIAK, Zbigniew LUTOWSKI, Sławomir BUJNOWSKI, Dariusz BOROŃSKI, Piotr CZAJKA
Eksperymentalny system do badań pęknięć podpowierzchniowych wykorzystujący dwa tory wizyjne, światła widzialnego i podczerwieni ... 99

Ewa MARCISZ, Adam NIESŁONY, Tadeusz ŁAGODA
Koncepcja wyznaczania charakterystyk zmęczeniowych dla materiałów z umocnieniem ... 101

Stanisław MROZIŃSKI, Michał PIOTROWSKI
Wpływ prędkości spawania laserowego na właściwości mechaniczne połączeń w rurach wielowarstwowych ... 103

Stanisław MROZIŃSKI, Radosław SKOCKI
Wpływ temperatury badań na parametry pętli histerezy ... 105

Stanisław MROZIŃSKI, Radosław SKOCKI, Grzegorz GOLAŃSKI, Krzysztof WERNER
Wpływ temperatury na dane materiałowe określane na podstawie niskocyklowych badań zmęczeniowych ... 107

Stanisław MROZIŃSKI, Sławomir WŁODARCZYK
Badanie staliwa w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego ... 109

Andrzej NEIMITZ
Odporność na pękanie rzeczywistych obiektów konstrukcyjnych – modele obliczeniowe ... 111

Adam NIESŁONY, Michał BÖHM
Wyznaczanie trwałości na postawie eksperymentalnych wykresów zmęczeniowych przy obciążeniu stało-amplitudowym z wartością średnią ... 113

Jerzy OKRAJNI, Grzegorz JUNAK
Model procesu odkształcania w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego ... 115

Roland PAWLICZEK
Wpływ wartości średniej w obciążeniach blokowych na kształt pętli histerezy przy zginaniu próbek ze stali S355 ... 117

Łukasz PEJKOWSKI, Dariusz SKIBICKI
Analiza porównawcza całkowych kryteriów zmęczeniowych w zakresie szacowania trwałości zmęczeniowej dla obciążeń nieproporcjonalnych ... 119

Łukasz PEJKOWSKI, Dariusz SKIBICKI
Modyfikacja zmęczeniowego kryterium Zennera ze względu na nieproporcjonalność obciążenia ... 121

Piotr REYMER, Andrzej LESKI, Krzysztof DRAGAN
Badanie trwałości zmęczeniowej struktury szkolnego samolotu ... 123

Grzegorz ROBAK, Marcel SZYMANIEC, Tadeusz ŁAGODA
Promień fikcyjny jako narzędzie do obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów z karbem ... 125

Jan SADOWSKI
Problem oceny punktu inicjacji rozwoju pęknięcia w próbie udarowego zginania ... 127

Dariusz SKIBICKI, Michał BURAK
Wyznaczanie trwałości zmęczeniowej w programie Ls-Dyna za pomocą modelu Lemaitre'a ... 129

Dariusz SKIBICKI, Janusz SEMPRUCH, Łukasz PEJKOWSKI
Badania trwałości stali X2CrNiMo17-12-2 dla obciążeń jednoosiowych, proporcjonalnych i nieproporcjonalnych w stanie dostawy i w stanie wyżarzonym ... 131

Dariusz SKIBICKI, Janusz SEMPRUCH, Łukasz PEJKOWSKI
Badania makropęknięć i przełomów stali X2CrNiMo17-12-2 poddanej jednoosiowemu, proporcjonalnemu i nieproporcjonalnemu obciążeniu zmęczeniowemu ... 133

Małgorzata SKORUPA, Andrzej SKORUPA, Tomasz MACHNIEWICZ, Adam KORBEL
Eksperymentalne badania inicjacji i rozwoju pęknięć zmęczeniowych w zakładkowych połączeniach nitowych konstrukcji lotniczych ... 135

Przemysław STRZELECKI, Janusz SEMPRUCH
Eksperymentalna weryfikacja analitycznej metody estymacji krzywej S-N w zakresie ograniczonej trwałości zmęczeniowej ... 137

Grzegorz SZALA, Bogdan LIGAJ
Analiza porównawcza metod obliczeń trwałości zmęczeniowej stali C45 w warunkach obciążeń o zmiennej amplitudzie w zakresie nisko i wysokocyklowego zmęczenia ... 139

Grzegorz SZALA, Bogdan LIGAJ
Modyfikacja matematycznych modeli dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych opartych na koncepcjach wykresów naprężeń granicznych Goodmana i Haigha ... 141

Józef SZALA
Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja – charakterystyka zbioru monografii ... 143

Józef SZALA
Założenia obliczeń trwałości zmęczeniowej dla zakresów nisko- i wysokocyklowego zmęczenia stopów metali ... 145

Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH
Stanowisko do badań zmęczeniowych minipróbki w warunkach zmiennego rozciągania ... 147

Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH
Wyznaczanie własności zmęczeniowych stopu aluminium z wykorzystaniem minipróbki ... 149

Tomasz TOPOLIŃSKI, Artur CICHAŃSKI, Adam MAZURKIEWICZ, Krzysztof NOWICKI
O pewnej metodzie wyznaczania wartości modułu stycznego w badaniach zmęczeniowych kości beleczkowej ... 151

Tomasz TOPOLIŃSKI, Artur CICHAŃSKI, Adam MAZURKIEWICZ, Krzysztof NOWICKI
Zastosowanie obciążeń stopniowo narastających do wyznaczania krzywych S-N kości beleczkowej z wykorzystaniem liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych ... 153

Krzysztof WERNER, Włodzimierz BARANOWSKI
Analiza możliwości szybkiej propagacji pęknięć w rurach z polietylenu z wadami ... 155

Mateusz WIRWICKI, Tomasz TOPOLIŃSKI
Badania statyczne i zmęczeniowe próbek zębiny i połączeń zębiny z wypełniaczami ... 157

Tadeusz Z. WOŹNIAK, Jerzy JELEŃKOWSKI, Krzysztof ROŻNIATOWSKI
Wpływ mikrostruktury na zmęczenie toczne łożysk ... 159

LISTA UCZESTNIKÓW XXIV SYMPOZJUM ZMĘCZENIE I MECHANIKA PĘKANIA ... 161

PRZEDMOWA

Jest banałem stwierdzenie, że czas biegnie nieubłaganie. Konstatacja tego faktu, odniesiona do realiów dnia codziennego przekłada się na obserwacje upływu kolejnych lat życia i aktywności ludzi, grup społecznych i zawodowych. Konieczna jest w tym kontekście refleksja dotycząca czasu który minął, ale też czasu przyszłego, jak i chwila zatrzymania się w codziennym zabieganiu przeznaczona na rozmowę, wymianę poglądów i dyskusję z ludźmi o podobnych zainteresowaniach np. zawodowych.

Tegoroczne spotkanie w ramach Sympozjum „Zmęczenia i Mechaniki Pękania" jest już 24. z kolei. Organizowane jest przez Międzysekcyjny Zespół Zmęczenia i Mechaniki Pękania Materiałów i Konstrukcji funkcjonujący w ramach Komitetu Budowy Maszyn PAN. 24. Sympozjum, podobnie jak szereg poprzednich, współorganizowane jest we współpracy z Wydziałem Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.

Historia Międzysekcyjnego Zespołu sięga 1971 roku. Ciekawych dokładnego zapisu historii Zespołu odsyłam do materiałów Sympozjum z 2002 roku, gdzie pozwoliłem sobie (korzystając z pamięci wielu Koleżanek i Kolegów) najważniejsze daty skatalogować. Czas zatem zauważyć, że minęło już czterdzieści lat aktywności Zespołu. Myślę, że okres ten uzasadnia także, może odrobinę nazbyt refleksyjny początek tego tekstu. Czas pomiędzy wspomnianym 2002 rokiem, kiedy to miało miejsce XIX Sympozjum, przyniósł spotkanie XX w 2004 roku, XXI 2006 w roku, XXII w 2008 roku, XXIII w 2010 roku. Wszystkie te wymienione powyżej spotkania miały miejsce w podbydgoskich Pieczyskach.

Kiedy myślimy o latach przeszłych, o historii Zespołu nieodmiennie nasuwa się na myśl wspomnienie profesora Stanisława Kocańdy, twórcy Zespołu i jego wieloletniego przewodniczącego. Profesor Stanisław Kocańda wniósł niewątpliwy wkład organizacyjny, skupiając ludzi zainteresowanych problematyką zmęczenia materiałów konstrukcyjnych, jak i elementów konstrukcyjnych, także problematyką szeroko rozumianej mechaniki pękania w jednym Zespole, mobilizując ich do cyklicznych spotkań, dyskusji i wyrażania myśli. Profesor Stanisław Kocańda był jednak przede wszystkim autorytetem merytorycznym tego środowiska. Dzisiaj, nieobecny już od pewnego czasu, pozostaje autorytetem – dzięki licznym publikacjom i pamiętany ciągle przez wielu przekaz bezpośredni, który tak wysoko cenimy.

Czterdzieści lat przyniosło wiele osiągnięć indywidualnych i zespołowych. Skutkowało ono licznymi awansami naukowymi przedstawicieli naszego środowiska. Najwybitniejszych przedstawicieli honorowaliśmy Medalem im. Profesora Stanisława Kocańdy. Byli to profesor Józef Szala (2008 rok) oraz profesor Andrzej Neimitz (2010 rok). Autorytety naszego środowiska wyróżniliśmy także zamieszczając ich noty biograficzne w materiałach Sympozjum. Poza wymienionymi powyżej byli to profesor Wacław Kasprzak oraz profesor Ewald Macha (obie noty w 2010 roku).

Tegoroczne spotkanie odbywa się bezpośrednio po wyborach do Komitetu Budowy Maszyn PAN. Członkami Komitetu wybrani zostali prof. Józef Szala oraz prof. Janusz Sempruch. W ramach nowo wybranego Komitetu dokonano wyborów przewodniczących Sekcji i Zespołów. Funkcję przewodniczącego Międzysekcyjnego Zespołu Zmęczenia i Mechaniki Pękania Materiałów i Konstrukcji na lata 2011-2015 powierzono niżej podpisanemu. XXIV Sympozjum towarzyszyć będzie kolejne spotkanie członków i ekspertów Zespołu, które opracuje plan pracy na kolejne lata.

Spotykamy się ponownie w Pieczyskach. Ta podbydgoska miejscowość wypoczynkowa w maju dopiero budzi się do życia, zapewniając właściwy dla naszego spotkania spokój, zapewniając jednocześnie kontakt z przyrodą i stwarzając właściwe warunki do pracy. Mam nadzieję, że zespół organizatorów Sympozjum także w tym roku sprosta Państwa oczekiwania.

Życzę w imieniu całego Zespołu organizatorów udanych obrad.

Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego

Prof. dr hab. inż. Janusz Sempruch

Łukasz BLACHA, Aleksander KAROLCZUK

IDENTYFIKACJA CHARAKTERYSTYKI ZMĘCZENIOWEJ „MATERIAŁU ZASTĘPCZEGO" DLA STALOWYCH ZŁĄCZY SPAWANYCH

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, l.blacha@doktorant.po.opole.pl

1. WPROWADZENIE

Obecność spoiny w elemencie konstrukcyjnym poddanym obciążeniom zmiennym determinuje strefę wpływu ciepła jako miejsce, w którym wystąpi inicjacja procesu zniszczenia. Złożony charakter problematyki wyznaczania trwałości zmęczeniowej nieobrobionych cieplnie złączy spawanych wynika z obecności w otoczeniu spoiny zarówno karbu geometrycznego, jak i strukturalnego. Niepewność w kwestii rzeczywistego kształtu lica spoiny, jej brzegu oraz niejednorodność właściwości mechanicznych i strukturalnych wymaga zastosowania w obliczeniach podejścia probabilistycznego – na przykład koncepcji najsłabszego ogniwa.

Metody oparte na koncepcji najsłabszego ogniwa należą do nielokalnych metod wyznaczania trwałości zmęczeniowej z uwagi na fakt uwzględnienia pola naprężeń a nie wartości lokalnych. Model obliczeniowy definiuje element konstrukcyjny jako, wywodzący się z teorii niezawodności, system niezależnych, szeregowo połączonych ogniw.

Proponowany model obliczeniowy jest rozwinięciem probabilistycznego modelu obliczeniowego przedstawionego w pracy [1] na zakres trwałości zmęczeniowej stalowych złączy spawanych. W celu wyznaczenia trwałości zmęczeniowej posłużono się rozkładem Weibulla. Prawdopodobieństwa zniszczenia P_z w funkcji liczby cykli N danego elementu konstrukcyjnego opisano następującą zależnością:

$$P_z(N) = 1 - e^{-\int_V \left(\frac{\log N}{\log N_f}\right)^p dV} \tag{1}$$

gdzie:

- V – analizowana objętość materiału,
- N – liczba cykli do zniszczenia,
- $\log(N_f)$ – parametr skali,
- p – parametr kształtu rozkładu.

2. REFERENCYJNA CHARAKTERYSTYKA ZMĘCZENIOWA

Parametr skali rozkładu (1) przyjęto w postaci logarytmicznej wartości liczby cykli do zniszczenia dla referencyjnego materiału zastępczego o następującej charakterystyce:

$$\log N_f = \log C_f - m_f \log \Delta\sigma \tag{2}$$

gdzie:

- C_f, m_f – parametry zmęczeniowe „materiału zastępczego",
- $\Delta\sigma$ – zakres naprężeń zredukowanych wyznaczony według wybranego kryterium wieloosiowego zmęczenia.

W celu identyfikacji wartości parametrów C_f i m_f wykorzystano charakterystyki FAT [2]. Na potrzeby procesu identyfikacji przeprowadzono obliczenia numeryczne dla różnych wariantów modelu dyskretnego, różniących się promieniem zaokrąglenia w linii wtopienia. Uzyskane wyniki pól naprężeń wykorzystane zostały jako dane do obliczeń iteracyjnych dla różnych wartości C_f i m_f oraz dla znanej wartości parametru p [3]. Wartości C_f i m_f jednoznacznie definiują referencyjną charakterystykę zmęczeniową (charakterystyka „materiału zastępczego").

LITERATURA

[1] Karolczuk A., 2009. Nielokalne metody obliczeń zmęczeniowych. Studia i monografie Politechniki Opolskiej 239, 168.
[2] Hobbacher A., 2007. Recomendations for fatigue design of welded joints and components. IIW dokument XIII-2151-07/XV-1254-07, May.
[3] Blacha Ł., Karolczuk A., Bański R., Stasiuk P., 2011. Eksperymentalna analiza trwałości zmęczeniowej krzyżowych złączy spawanych w odniesieniu do wielkości elementu. Acta Mechanica et Automatica 5(3), 15-20.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/N/ST8/02566.

Wojciech BŁAŻEJEWSKI, Paweł GĄSIOR, Jerzy KALETA, Radosław RYBCZYŃSKI

BADANIA ZMĘCZENIOWE WYSOKOCIŚNIENIOWEGO ZBIORNIKA KOMPOZYTOWEGO TYPU CZWARTEGO Z PROGRAMOWANYMI DEFEKTAMI

Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej,
ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

1. WSTĘP – ZBIORNIKI WYSOKOCIŚNIENIOWE

Wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe znajdują obecnie szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach (przemysł samochodowy, lotnictwo, służby ratownicze, itp.). Zbiorniki typu 4 (całkowicie kompozytowe), przeznaczone do przechowywania sprężonych gazów (w tym metanu - CNG i wodoru – CH2), są zbudowane z dwóch warstw. Wewnętrzna (tzw. liner) jest barierą uniemożliwiającą przenikanie cząsteczek gazu. Liner wykonany jest z tworzywa sztucznego. Warstwa zewnętrzna przenosi obciążenia i najczęściej wykonana jest z kompozytu węglowo-epoksydowego. Warstwy kompozytu ułożone są w sposób uporządkowany i zaprogramowany [1].

Istotnym problemem jest wykrywanie i identyfikacja defektów powstających w strukturze kompozytu, w ich wczesnym stadium. Uszkodzenia te są następstwem zmęczenia materiału na skutek obciążeń cyklicznych (np. tankowania i „roztankowania" zbiornika) bądź też zewnętrznych uderzeń czy też przekroczenia dopuszczalnych wartości naprężeń (ciśnień) i temperatury pracy. Normy badania zbiorników, przeznaczonych do gromadzenia wysokosprężonych paliw, np. [2, 3], klasyfikują dwa podstawowe typy defektów. Są to nacięcia (*flaw*) oraz delaminacje (*delamination*). Zgodnie z normami, zbiornik z istniejącym defektem powinien spełniać wymagania w zakresie obciążeń cyklicznych w temperaturze pokojowej to ma miejsce w przypadku zbiornika bez defektów.

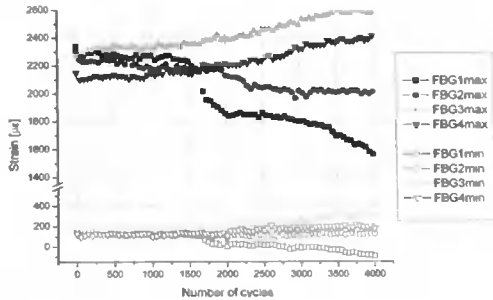
2. BADANIA CYKLICZNE ZBIORNIKÓW Z DEFEKTAMI

Badania zbiorników z nacięciami (rys. 1a) są określane w normach mianem *Composite flaw tolerance test*. W normie rozmiar defektu może być określony jako „większy niż limit dla wizualnej inspekcji, określony przez producenta zbiornika", a zarazem nie mniejszy niż: 25 mm długości x 1,25 mm głębokości, lub 200 mm długości x 0,75 mm głębokości. W badanych zbiornikach nacięcia wykonane zostały w powłoce kompozytowej w kierunku równoległym do jego osi głównej. Po wykonaniu defektów, zbiornik został poddany standardowej próbie cyklicznej w zakresie ciśnień od 20 do 258,5 barów (rys.1b). Widmo obciążenia miało charakter trapezowy. W trakcie badań zmęczeniowych na powierzchni zbiornika z wykorzystaniem światłowodowych przetworników FBG (12 sztuk) rejestrowane były lokalne zmiany odkształceń obwodowych.

Na rysunku 1b przedstawiono wyniki pomiarów maksymalnych i minimalnych wartości odkształceń, w przekroju zawierającym krótsze z nacięć – w funkcji obciążeń cyklicznych. Należy zauważyć, iż w analizowanym przekroju, wraz ze wzrostem liczby cykli, spada wartość odkształceń rejestrowanych przez FBG1 oraz FBG2, znajdujących

się najbliżej defektu. Jednocześnie następuje wzrost amplitudy odkształceń rejestrowanych przez pozostałe czujniki. Świadczy to o kumulacji lokalnych uszkodzeń w powłoce nośnej zbiornika kompozytowego, a także wzroście programowanego defektu [4].

a)



b)

Rys. 1. Zbiornik kompozytowy z defektami programowanymi w postaci nacięć oraz pomiary lokalnych odkształceń powłoki kompozytowej w funkcji liczby cykli [4]

3. PODSUMOWANIE

Badania cykliczne na obiektach z tzw. programowanymi defektami (o znanej geometrii) umożliwiły przetestowanie zaproponowanej metody wykrywania uszkodzeń, powstających w strukturze kompozytowego wzmocnienia zbiornika, w trakcie jego eksploatacji. Udokumentowano pełną przydatność czujników światłowodowych FBG do pomiaru lokalnych odkształceń, w tym również kumulacji defektów.

LITERATURA

[1] Kaleta J., Błażejewski W., Gąsior, P., 2008. Metodyka i przykłady badan zmęczeniowych wysokociśnieniowych butli kompozytowych na paliwa gazowe. XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska.
[2] Regulation No. 110, Rev.2/Add.109/Rev.1.
[3] ISO/DIS15869.3, 2008. Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land vehicle fuel tanks.
[4] Gąsior P., 2012. Metoda monitorowania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych na paliwa gazowe z wykorzystaniem pomiarów odkształceń czujnikami światłowodowymi. Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, praca niepublikowana (w przygotowaniu).

Badania zrealizowano w ramach projektu POIG: „Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii. Zadanie 2.5. Magazynowanie biogazu oraz wykorzystanie jako paliwa do silnika spalinowego".

Zdzisław BOGDANOWICZ, Krzysztof GRZELAK

PĘKANIE ZMĘCZENIOWE PRZYCZYNĄ USZKODZENIA ELEMENTÓW SILNIKA SPALINOWEGO

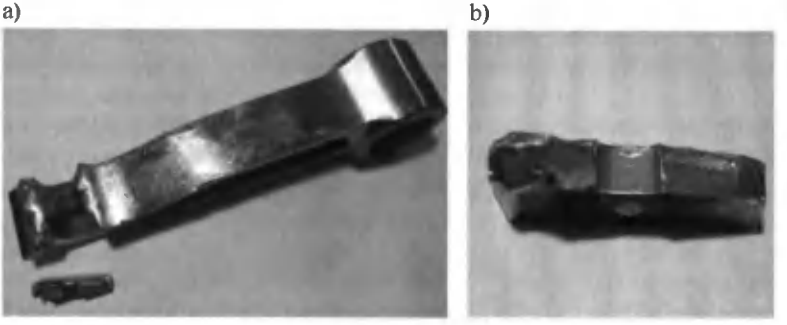
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

1. WSTĘP

Pękanie zmęczeniowe stalowych konstrukcji mechanicznych zwykle prowadzi do awarii lub trwałego ich uszkodzenia. Wpływa jednocześnie na zagrożenia związane z bezpieczeństwem i wiąże się zawsze z stratami finansowymi, a niejednokrotnie i ekologicznymi. Może być również przyczyną tragedii, w których osoby fizyczne doznają utraty zdrowia lub życia. W artykule przedstawione zostaną przykładowe rezultaty badań uszkodzeń zmęczeniowych elementów silnika spalinowego pojazdów mechanicznych opracowane na zlecenie kontrahenta [1, 2].

2. PĘKANIE ZMĘCZENIOWE STOPY KORBOWODU DOCZEPNEGO SILNIKA SPALINOWEGO DUŻEJ MOCY

Uszkodzenie korbowodu doczepnego było wynikiem pękania zmęczeniowego płetwy stopy korbowodu. Inicjacja pękania wywołana została spiętrzeniem naprężeń od karbu geometrycznego powstałego na dnie rozcięcia płetwowego stopy korbowodu. W miejscu tym przejście promieniem R 3 (mm) nie było styczne do płaszczyzny bocznej płetwy, tak jak wynika to z wymogów konstrukcyjnych, lecz mijało ją, dając ostrą krawędź. Po powstaniu przełomu zainicjowany został proces rozklepywania udarowego tulejki łożyska ślizgowego. W końcowym etapie awarii tulejka łożyska ślizgowego w górnej jej części została całkowicie zniszczona, a jej drobne fragmenty wydostawały się na zewnątrz skojarzenia ślizgowego. Górna część stopy korbowodu doczepnego współpracowała bezpośrednio na sworzniu aż do momentu całkowitego zerwania powodującego blokadę wału silnika i pęknięcie bloku.

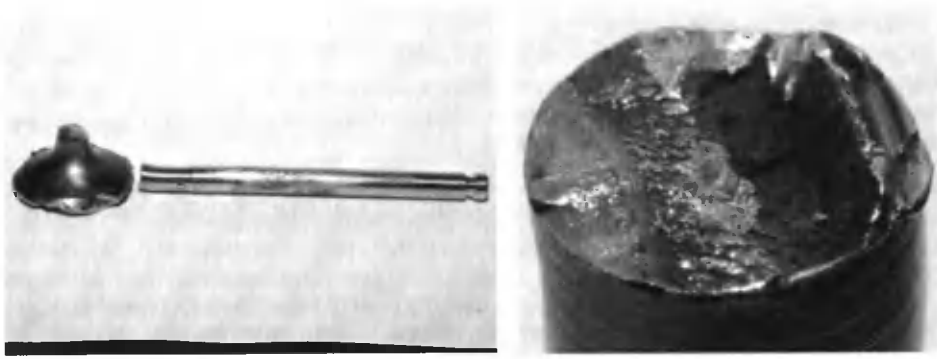


Rys. 1. Korbowód doczepny z uszkodzona stopą (a) oraz jego przełom zmęczeniowy (b)

3. PĘKANIE ZMĘCZENIOWE TRZONKA ZAWORU SILNIKA SAMOCHODU OSOBOWEGO

Przyczyną uszkodzenia było zatarcie trzonka zaworu w prowadnicy wywołane zbyt ciasnym pasowaniem. Opory ruchu powstałe między trzonkiem a prowadnicą w wyniku zacierania się wzrosły na tyle, że uniemożliwiły sprężynie zaworowej zamykanie zaworu. Częściowo otwarty zawór był przepychany przez tłok, powodując cykliczne zginanie grzybka zaworu. Cykliczność zmian obciążenia zginającego doprowadziła do pękania zmęczeniowego w krytycznym przekroju, na przejściu grzybka w trzonek w miejscu karbu geometrycznego wynikającego z konstrukcji zaworu. Występujący po awarii przełom nosi znamiona klasycznego przełomu zmęczeniowego składającego się ze strefy zmęczeniowej makroskopowo gładkiej i resztkowej, mocno pofałdowanej o licznych uskokach.

a) b)



Rys. 2. Uszkodzony zawór ssący silnika (a) oraz jego przełom zmęczeniowy (b)

LITERATURA

[1] Górski J., 2002. Ocena przybliżonych metod wyznaczania wypadkowego zakresu naprężeń w wytrzymałości zmęczeniowej węzłów konstrukcyjnych kadłuba statku. XX Sesja Naukowa Okrętów, Gdańsk.

[2] Mrzygłód M., 2005. Parametryczna optymalizacja konstrukcji pracujących przy obciążeniach wysokocyklowych, Politechnika Krakowska (praca niepublikowana).

Dariusz BOROŃSKI

BADANIE WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH Z ZASTOSOWANIEM MINIPRÓBEK

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Rozwój metod analizy zmęczeniowej bazujących na podejściu lokalnym powoduje, że coraz bardziej pożądane są informacje o lokalnych, cyklicznych własnościach materiałów konstrukcyjnych. Dotyczy to zarówno materiałów niejednorodnych, jak i jednorodnych, które mogą zmieniać swoje bazowe własności w wyniku zastosowanych technologii wykonywania elementów konstrukcyjnych lub na skutek działających obciążeń. Szczególną grupą tych ostatnich stanowią złącza wykonywane technikami spajania. Jednak początek badaniom na próbkach w skali mini dał rozwoju materiałów stosowanych w energetyce jądrowej, w tym materiałów poddanych promieniowaniu [1]. Powstały w tym czasie różne techniki badań oraz przygotowywania próbek do badań, a zagadnieniu badań na „małych próbkach" poświęcono, m.in. cykliczną konferencję „Small Specimen Test Techniques". Prowadzenie badań własności mechanicznych na małych próbkach stało się także koniecznością w przypadku materiałów stosowanych na mikrostruktury elektromechaniczne typu MEMS. Opracowane rozwiązania techniczne w zakresie oprzyrządowania do badań, jak i metod przygotowywania próbek przedstawiono szerzej w monografii [2].

2. SYSTEM DO BADAŃ WŁASNOŚCI ZMĘCZENIOWYCH MIKROELEMENTÓW (MFS)

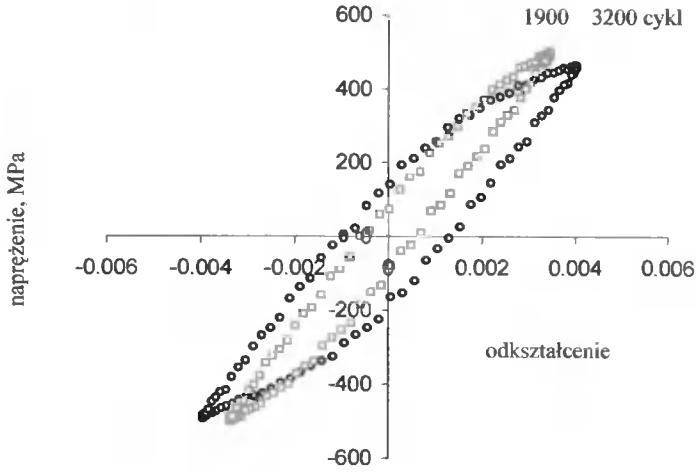
System MFS do badań własności mechanicznych mikroelementów został opracowany w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn w ramach projektu badawczego rozwojowego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. W skład systemu MFS wchodzą, m.in. układy: obciążający „nanodrive", obciążający „microdrive", pomiaru odkształceń metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC), pomiaru odkształceń metodą laserowej interferometrii siatkowej (LFI), precyzyjne układy osiowania i mocowania obiektów, skomputeryzowany układ sterowania i zasilania.

Ogólny widok systemu pokazano na rysunku 1 obok przykładowej próbki do badań trwałości zmęczeniowej. Dzięki zastosowanym rozwiązaniom, w tym zdublowanemu systemowi obciążenia bazującemu na siłowniku piezo i mikrokowym silniku z precyzyjną śrubą toczną, system MFS umożliwia wyznaczanie z nanometryczną dokładnością wielu statycznych i zmęczeniowych własności materiałowych, w tym, m.in. wykresów statycznego rozciągania, wykresów cyklicznego odkształcania, wykresów trwałości zmęczeniowej w ujęciu siłowym, naprężeniowym, odkształceniowym. Optoelektroniczne układy pomiarowe zastosowane w systemie umożliwiają pomiar odkształceń na bazach pomiarowych o mikrometrycznej długości.

a) b)

Rys. 1. System MFS (a) i przykładowa minipróbka na tle monety (b)

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe pętle histerezy zarejestrowane dla różnych faz przebiegu obciążenia stałoamplitudowego próbki pobranej z materiału rodzimego ze złącza spawanego laserowo wykonanego ze stali 18G2A.



Rys. 2. Przykładowe pętle histerezy dla minipróbki pobranej ze złącza spawanego laserowo ze stali 18G2A

Szersze przykłady badań przedstawione zostaną podczas obrad XXIV Sympozjonu Zmęczenia i Mechaniki Pękania.

LITERATURA

[1] Lucas G.E., 1990. Review of small specimen test techniques for irradiation testing. Journal Metallurgical and Materials Transactions A 21(5).

[2] Boroński D. 2009. Lokalne własności materiałowe w analizie zmęczeniowej. [W:] Zbiorze monografii: Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, Bydgoszcz-Radom.

Dariusz BOROŃSKI*, Piotr KIEDROWSKI**

BADANIA WPŁYWU SPAWANIA ŚWIATŁOWODÓW NA ICH WYTRZYMAŁOŚĆ MECHANICZNĄ

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz
** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Telekomunikacji
i Elektrotechniki, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

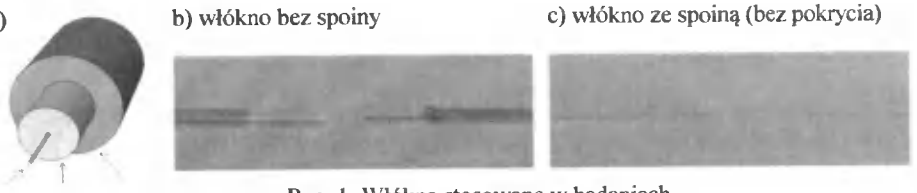
Nowoczesne sieci światłowodowe budowane w gęstej infrastrukturze miejskiej oraz wykonywane w technologiach FTTB (ang. Fibre To The Building) i FTTH ang. (Fibre To The Home) wymagają nowych, bardzo pojemnych sposobów prowadzenia światłowodów. w tym celu wykorzystano znane od kilku lat systemy mikrokanalizacji światłowodowej [1] umożliwiające prowadzenie mikrokabli lub włókien w tubach o średnicy od 4 do 18 mm, czyli małogabarytowych. Biorąc pod uwagę zapewnienie możliwości realizacji aktualnych zapotrzebowań na usługi telekomunikacyjne, międzynarodowa organizacja ITU-T w 2007 roku określiła wymagania i parametry nowych włókien światłowodowych przeznaczonych do zastosowania w sieciach dostępowych [2]. Ten typ światłowodów, od oznaczenia zalecania, określany jest jako G.657. Główną właściwością światłowodów G.657 jest stosunkowo małe tłumienie w miejscach zgięcia światłowodu, co pozwala na zastosowanie ich w istniejącej infrastrukturze budynków. Istotnym problemem jest jednak konieczność stosowanie muf w miejscach łączenia włókien. Światłowody telekomunikacyjne (rys.1a) mają znormalizowaną zewnętrzną średnicę płaszcza równą 125μm oraz pokrycie pierwotne o średnicy ok. 250 μm. Średnica rdzenia włókna jednomodowe wynosi 5÷10 μm. Pokrycie pierwotne jest warstwą zewnętrzną, która nakładana jest w trakcie procesu wyciągania włókna i która pełni funkcję ochronno-wzmacniającą. Włókna światłowodowe są bardzo delikatne, dlatego w konstrukcji kabla stosuje się szereg rozwiązań mających na celu ochronę włókien przed uszkodzeniami mechanicznymi, takimi jak: mikropęknięcia, pęknięcia rdzenia i płaszcza oraz zerwanie włókna. Parametry wytrzymałościowe włókien światłowodowych zdefiniowane są w zaleceniach ITU-T serii G.65x oraz w [3].

Ze względu na parametry transmisyjne, najkorzystniejszym sposobem łączenia włókien są nierozłączne połączenia spawane termicznie. Przed procesem spawania jednym z niezbędnych zabiegów jest usunięcie ochronnego pokrycia pierwotnego na odcinku kilku centymetrów na każdym z końców dwóch spawanych włókien. Włókno pozbawione pokrycia pierwotnego nazywane jest gołym włóknem. Gołe włókno po procesie spawania narażone jest na działanie różnych czynników, w tym przede wszystkim obciążeń mechanicznych. W celu ich ochrony stosowane są mufy, które jednak zajmują bardzo dużo miejsca w stosunku do wymiarów włókna.

Możliwość zastosowania innej metody zabezpieczania łączonych włókien bez konieczności stosowania muf, prowadziłaby do zwiększenia pojemności dystrybucji, w szczególności w systemach mikrokanalizacji światłowodowej.

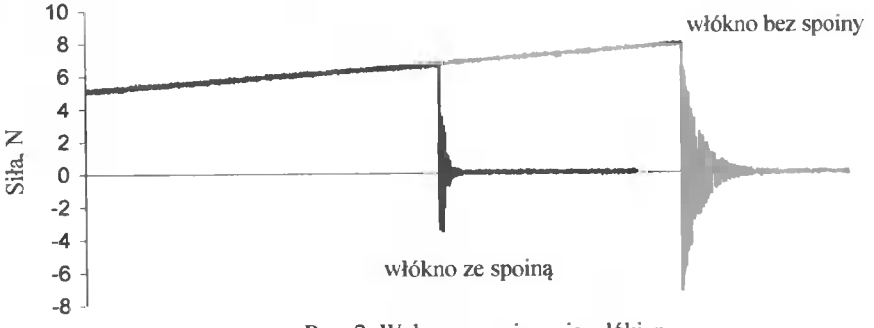
2. BADANIA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH WŁÓKIEN ŚWIATŁOWODOWYCH

Opracowanie nowej technologii zabezpieczania włókien w miejscu ich spawania (np. poprzez wykorzystanie sąsiednich włókien w kablu) wymaga przeprowadzenia badań ich własności zarówno dla gołego włókna, jak i gołego włókna ze spoiną (rysunek 1a i b). Ze względu na bardzo małe wymiary pojedynczego włókna światłowodowego, testy wytrzymałościowe w warunkach obciążeń monotonicznie i cyklicznie zmiennych realizowane są z zastosowaniem systemu do badań statycznych i zmęczeniowych na mikroobiektach MFS.



Rys. 1. Włókna stosowane w badaniach

W badaniach stosowane są próbki włókna typu G.657 ze zdjętym pokryciem pierwotnym, bez (rys.1b) i ze spawem (rys.1c). Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wykresy rozciągania włókien wyznaczone w próbie monotonicznego rozciągania.



Rys. 2. Wykresy rozciągania włókien

Wstępne wyniki badań wskazują na osłabienie włókna w miejscu występowania spoiny, przy jednoczesnym zwiększeniu zagrożenia włókna na pęknięcie w wyniku jego zginania lub obciążenia krawędziowego (np. w wyniku kontaktu ze sztywną podporą z ostrą krawędzią). Szczegółowe wyniki badań przedstawione zostaną podczas obrad XXIV Sympozjonu Zmęczenia i Mechaniki Pękania.

LITERATURA

[1] www.elemat.pl
[2] ITU-T Recommendation G.657 (12/2006): Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibre and Cable For the Access Network, Genewa 2007.
[3] IEC 62048: Optical Fibres – Reliability – Power law theory, 2002.

Michał BÖHM, Adam NIESŁONY

PRZEGLĄD MODELI UWZGLĘDNIAJĄCYCH WPŁYW WARTOŚCI ŚREDNIEJ NAPRĘŻENIA NA TRWAŁOŚĆ W JEDNOOSIOWYM STANIE OBCIĄŻENIA

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. S. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WPROWADZENIE

Powszechnie występujące w konstrukcjach inżynierskich zmęczenie materiału jest zagadnieniem złożonym i wymaga uwzględnienia wielu czynników w procesie projektowania. Jednym z kluczowych elementów prognozowania trwałości zmęczeniowej jest uwzględnienie wpływu wartości średniej obciążenia, którego brak może doprowadzić do niebezpiecznego przeszacowania trwałości zmęczeniowej. Praca zawiera przegląd modeli naprężeniowych uwzględniających wpływ wartości średniej na trwałość zmęczeniową (tabela 1). Większość z nich pozwala na obliczenie tak zwanej amplitudy transformowanej naprężenia σ_{aT}, która wraz z podstawową charakterystyką zmęczeniową materiału ($R = -1$) umożliwia prawidłowe wyznaczenie trwałości zmęczeniowej.

Tabela 1. Wybrane modele naprężeniowe uwzględnienia wartości średniej naprężenia

Autor/Rok	Model	Autor/Rok	Model
Gerber 1874 [4]	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aT}} = 1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2$,	SWT 1970 [2]	$\sigma_{aT} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\sigma_a}$,
Goodman 1899 [5]	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aT}} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_m}$,	Walker 1979 [2]	$\sigma_{aT} = (\sigma_{\max})^{1-\gamma}\sigma_a^{\gamma}$,
Soderberg 1930 [11]	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aT}} = 1 \quad \frac{\sigma_m}{R_e}$,	Bagci 1983 [1]	$\sigma_{aT} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_e}\right)^4}$,
Smith 1942 [10]	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aT}} = \frac{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}}{1 + \frac{\sigma_m}{R_m}}$,	Pawliczek 2001 [9]	$\sigma_{aT} = \sigma_a + \psi_\sigma(N)\sigma_m$,
Marin 1949 [7]	$\sigma_{aT} = \frac{\sigma_a}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^n}}$,	Kwofie 2001 [6]	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aT}} = \exp\left(-\alpha \cdot \frac{\sigma_m}{R_m}\right)$,
Morrow 1960 [8]	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aT}} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}$,	Gang Tao 2007 [3]	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aT}} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_r}$,

gdzie: σ_a – amplituda przebiegu naprężenia, σ_m – wartość średnia naprężenia, R_m – wytrzymałość na rozciąganie, R_e – granica plastyczności, σ_f – współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej, α – współczynnik wrażliwości materiału na wartość średnią,

σ_r' – naprężenie referencyjne uzależnione od stałej materiałowej η, $\psi_\sigma(N)$ współczynnik wrażliwości materiału na wartość średnią, γ – stała dopasowania krzywej.

2. SPOSTRZEŻENIA ORAZ WNIOSKI KOŃCOWE

Celem pracy jest przedstawienie i analiza jak najszerszego grona modeli z grupy popularnych, jak również tych słabo znanych, stosowanych głównie w jednoosiowym stanie obciążenia. Większość przedstawionych modeli wykorzystuje stałe materiałowe otrzymywane na podstawie monotonicznego rozciągania. Uzasadnionym jest więc sądzić, że nie będą one opisywać zjawiska zmęczenia prawidłowo dla szerokiego spektrum materiałów. Korzystając z tych modeli, należy za każdym razem sprawdzić ich przydatność w algorytmie obliczeniowym, porównując z wynikami testów eksperymentalnych. Podejście naprężeniowe zastosowane w przedstawionych modelach jest „czytelniejsze" dla inżyniera i stosunkowo łatwe do zastosowania. Niektóre z modeli przejawiają liniowy charakter, co pozwala na zapis:

$$\sigma_{aT} = \sigma_a K(\sigma_m, P), \tag{1}$$

gdzie wpływ wartości średniej wyrażony jest współczynnikiem K niezależnym od liczby cykli i amplitudy naprężenia.

LITERATURA

[1] Bagci C., 1981. Fatigue design of machine elements using Bagci line defining the fatigue failure surface line, Mechanism and Machine Theory 16, 339.
[2] Dowling N., 2004. Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue, Society of Automotive Engineers, 14.
[3] Gang T., Zihui X., 2007. Mean stress/strain effect on fatigue behavior of an epoxy resin. International Journal of Fatigue 29, 2180-2190.
[4] Gerber W., 1874. Bestimmung der zulässigen Spannungen in Eisen Konstruktionen. Z Bayer Arch Ing Ver, 6.
[5] Goodman J., 1954. Mechanics Applied to Engineering, Longmans, Green and Co. New York.
[6] Kwofie S., 2001. An exponential stress function for predicting fatigue strength and life due to mean stresses. International Journal of Fatigue 23, 829-836.
[7] Marin J., 1949. Biaxial tension-torsion fatigue strength of metals. Journal of Applied Mechanics 16, 383-388.
[8] Morrow J., 1968. In Fatigue design handbook, advances in engineering. 4, Warrendale (PA): Society of Automotive Engineers.
[9] Pawliczek R., 2001. Badanie wpływu parametrów obciążenia i geometrii karbu na trwałość przy zmiennym zginaniu i skręcaniu, Opole.
[10] Smith J., 1942. The effect of range of stress on fatigue strength. Univ. Illinois Eng. Expt. Station Bull.
[11] Soderberg C., 1930. Factor of safety and working stress. Trans. ASME 52.

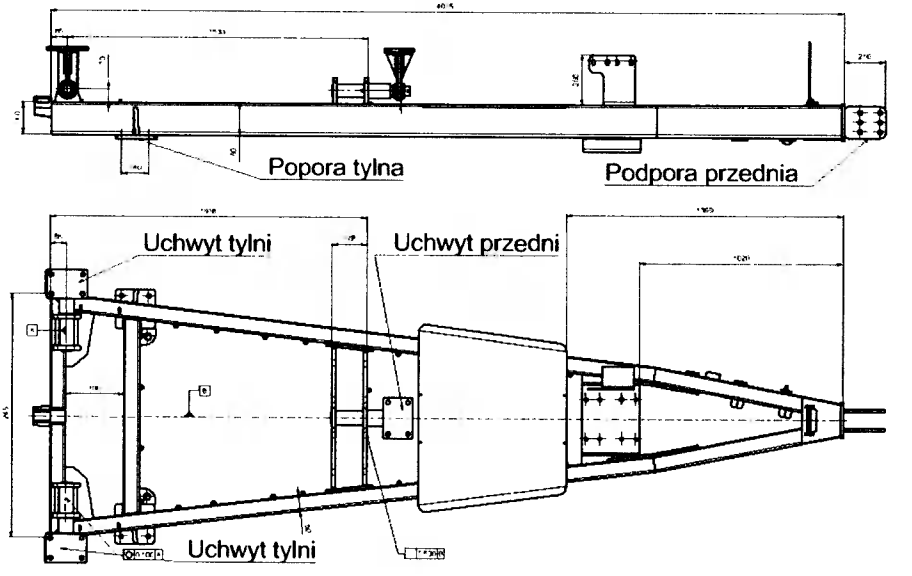
Michał BURAK, Artur CICHAŃSKI, Dariusz SKIBICKI

ANALITYCZNA, NUMERYCZNA I TENSOMETRYCZNA ANALIZA RAM NOŚNYCH WOZÓW PASZOWYCH EVO 12

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
ul. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. OBIEKTY BADAŃ

Badaniom poddano ramy nośne wozów paszowych EVO 12 produkowanych przez firmę Alima-Agri ze Środy Wielkopolskiej. Ramy ze stali S235JR wykonane były za pomocą spawania. Na uchwytach (rys. 1) posadowiony jest kosz w którym umieszczony jest ślimak do mieszania paszy. Rozważania dotyczyły standardowej konstrukcji ramy oraz wersji obniżonej.

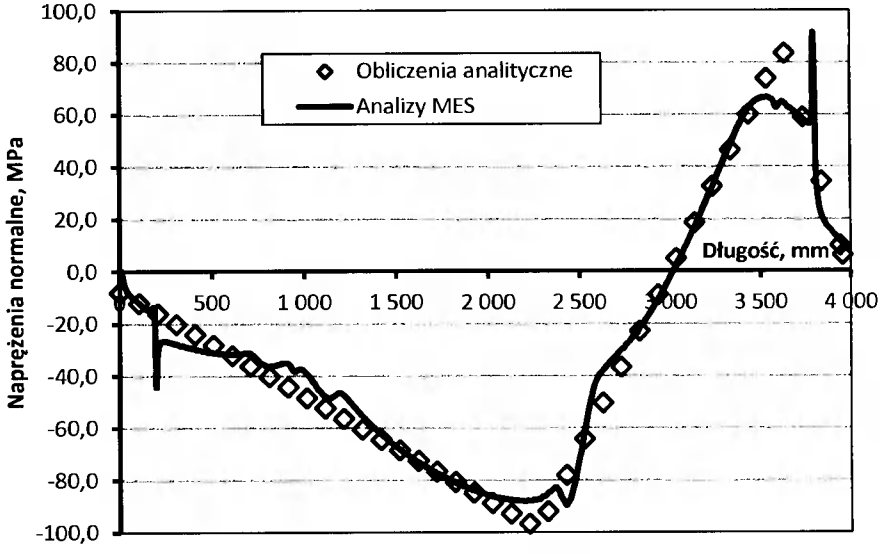


Rys. 1. Rama EVO 12 w wersji standardowej

Rama obciążona jest trzema siłami: w uchwycie przednim siłą 34,3 kN oraz uchwytach tylnych siłami 23,6 kN. Podpory leżące w części tylnej ramy służą do zamontowania osi z kołami. Funkcję podpory przedniej spełnia hak pociągowy. Główne belki nośne wykonane są z kształtowników zamkniętych 80x160. W ramie niskiej przesunięto podpory tylne na czoło belki nośnej tak, że oś koła przymocowanego do podpory leży na wysokości górnej półki belki. Przesunięcie to spowodowało zwiększenie odległości między podporami.

2. WYNIKI ANALIZ

Dla obu ram wykonano obliczenia analityczne opierając się na teorii ustrojów belkowych [2] oraz analizy numeryczne za pomocą metodą elementów skończonych [1] w środowisku programu ANSYS Workbench. Ponadto ptrzeprowadzono weryfikację tensometryczną konstrukcji w wybranych punktach belek głównych. Zestawienie wyników obliczeń analitycznych i analiz MES wykonanych dla belki głownej ramy standardowej przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wyniki obliczeń analitycznych i analiz MES dla belki głównej ramy standardowej

Porównanie wyników analiz ramy standardowej z niską przeprowadzone obiema metodami wykazało poprawność numerycznego modelowania konstrukcji. Pomiary tensometryczne również potwierdziły wskazaną poprawność. W wyniku przeprowadzonych obliczeń MES wyznaczono mapy rozkładów naprężeń w poszczególnych elementach obu rozważanych ram. Analiza tak wyznaczonych rozkładów wskazała poprawne zwymiarowanie ramy niskiej. W przypadku ramy niskiej stwierdzono znaczne przekroczenie naprężeń dopuszczalnych w okolicach uchwytów do mocowania kosza.

LITERATURA

[1] Rakowski G., Kacprzyk Z., 2005. Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
[2] Ugural A.C., 2008. Mechanics of Materials. John Wiley&Sons. Inc.

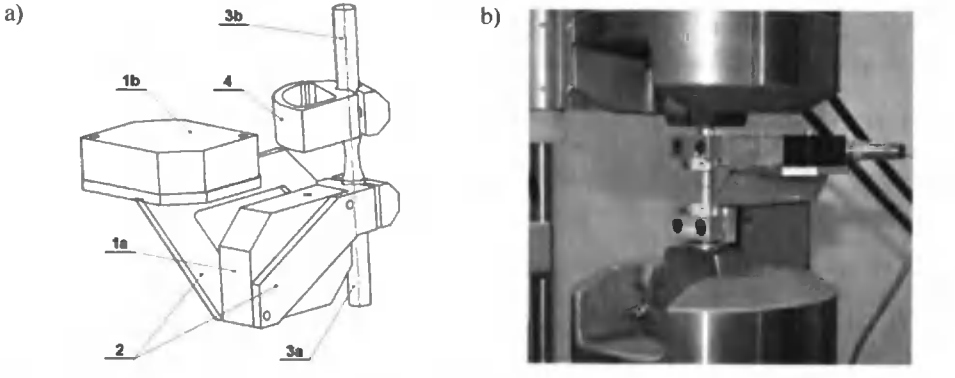
Łukasz DERPEŃSKI, Andrzej SEWERYN

BEZDOTYKOWY POMIAR WYDŁUŻENIA I KĄTA SKRĘCENIA BAZY POMIAROWEJ PRÓBKI W BADANIACH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

1. WSTĘP I METODYKA POMIARU

Ważnym elementem doświadczalnych badań wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej w złożonym stanie obciążenia jest dokładny pomiar wydłużenia i kąta skręcenia bazy pomiarowej próbek, stąd też większość prac badawczych badań dotyczy jednoosiowych stanów obciążenia (rozciąganie lub ściskanie) [1]. W pracy zaproponowano urządzenie do jednoczesnego bezdotykowego pomiaru wydłużenia oraz kąta skręcenia próbek [2], wykorzystujące dwa niezależnie pracujące czujniki laserowe (1a) i (1b), umożliwiające wykonywanie pomiarów w szerokim zakresie kąta obrotu: $\varphi = \pm 30°$ oraz wydłużenia bazy pomiarowej: $u = \pm 10$ mm. Lasery zamocowane są w dolnej części bazy pomiarowej próbki (3a) za pomocą uchwytu. Drugi element (4) w postaci krzywki (kształt spirali Archimedesa) zamocowany jest w górnej części bazy pomiarowej próbki (3b) (rys. 1). Krzywka ma dwie powierzchnie robocze wykonane z bardzo dużą dokładnością. Jedna (planarna) służy do pomiaru wydłużenia, druga (spiralna) niezbędna jest do określenia kąta obrotu. Kształt powierzchni spiralnej dobrano w taki sposób, aby przy stałym przyroście kąta obrotu uzyskać stałe wydłużenie wiązki lasera. Wykorzystując dwie bardzo dokładnie przygotowane powierzchnie krzywki, można dokonać pomiaru z dokładnością równą 0.005 mm.

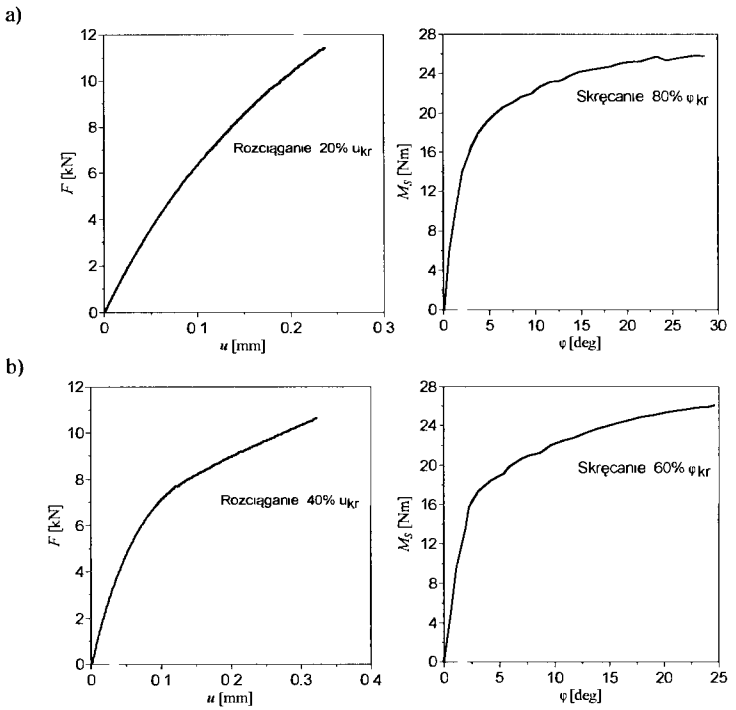


Rys. 1. Urządzenie do bezdotykowego pomiaru wydłużenia oraz kąta skręcenia próbki: a) schemat, b) zamocowane w maszynie wytrzymałościowej

Wydłużenie bazy pomiarowej odczytuje się na podstawie zmiany długości wiązki lasera (1a) ograniczonej powierzchnią planarną krzywki, prostopadłą do wiązki lasera. Kąt obrotu wyznacza się na podstawie zmiany długości wiązki lasera (1b) ograniczonej powierzchnią spiralną, w czasie obrotu części ruchomej (3b) próbki.

2. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW

Przykładowe wyniki badań (zależności wydłużenia od siły rozciągającej oraz kąta skręcenia od momentu skręcającego) przeprowadzonych na osiowo-symetrycznych próbkach z karbami, poddanych jednoczesnemu monotonicznemu rozciąganiu i skręcaniu, do momentu zniszczenia próbki, przedstawiono na rysunku 2. Otrzymano je dla różnych proporcji składowych obciążenia.



Rys. 2. Wyniki pomiarów dla próbki z karbem r_k = 4 mm; ϕ_k = 7 mm dla zadanego obciążenia o proporcjach: a) 80% φ_{kr} – 20% u_{kr}, b) 40% u_{kr} – 60% φ_{kr}

LITERATURA

[1] Derpeński Ł., Seweryn A., 2011. Experimental research into fracture of EN-AW 2024 and EN-AW 2007 aluminum alloy specimens witch notches subjected to tension. Experimental Mechanics 51(7), 1075-1094.

[2] Derpeński Ł., Koniuszewski R., Zgłoszenie patentowe nr P.397561. Urządzenie do bezdotykowego pomiaru wydłużenia oraz kąta skręcenia elementów konstrukcyjnych.

Pracę wykonano w ramach projektu nr N N501 120536 realizowanego w Politechnice Białostockiej, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Anna FALKOWSKA, Andrzej SEWERYN

DOŚWIADCZALNE BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI I TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ SPIEKÓW POROWATYCH STALI IMPLANTACYJNEJ 316L

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

1. WSTĘP

Pomimo dużego zainteresowania spiekami porowatymi stali implantacyjnej 316L, dostępnych jest niewiele publikacji które określałyby właściwości mechaniczne, a przede wszystkim wytrzymałościowe, tego materiału. Dostępne są wyniki badań wytrzymałościowych spieków stali 316L tylko dla przypadku dużego zagęszczenia proszków (i przez to małej porowatości) [1]. Ponadto istnieją publikacje opisujące badania właściwości mechanicznych przy zastosowaniu różnych parametrów technologicznych spieków [2]. Inne z badań uwzględniają wpływ różnego rozmiaru porów na właściwości mechaniczne [3]. W przypadku wyników opisujących badania trwałości zmęczeniowej spieków porowatych stali 316L dostępnych jest niewiele informacji, ponadto są to wyniki niepełne i nie prowadzą do sformułowania modelu obliczeniowego kumulacji uszkodzeń [4].

2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK I STANOWISKO BADAWCZE

Materiałem użytym do badań był proszek stali austenitycznej 316L o wielkości ziaren 125-250 μm. Wyżarzony proszek prasowano na zimno w matrycy. Użyto średnich nacisków 200, 400 oraz 600 MPa, przez co otrzymano wypraski o trzech stopniach porowatości 41%, 33% i 26%. Trzecim etapem było spiekanie wyprasek w temperaturze 1230°C, zaś ostatnim procesem, dzięki któremu otrzymano finalną postać próbek do badań była obróbka wykańczająca – cięcie strumieniem wody.

Próby rozciągania oraz badania zmęczeniowe przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 858 Mini Bionix. Uwzględniając kształt próbki oraz strukturę materiału zaprojektowano oraz wykonano specjalne uchwyty mocujące do maszyny wytrzymałościowej.

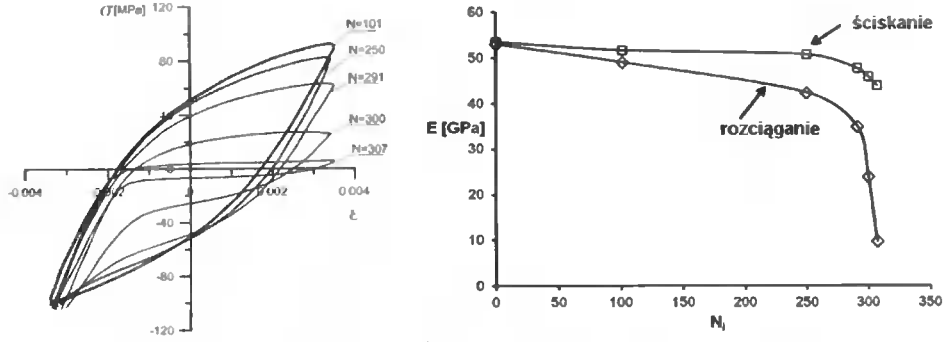
3. BADANIA PRÓBEK ZE SPIEKÓW POROWATYCH STALI 316L

Pierwszym krokiem były próby monotonicznego rozciągania próbek ze spieków stali 316L, z uwzględnieniem trzech stopni porowatości. Określono właściwości materiału, takie jak: moduły sprężystości E, granice plastyczności $R_{0,2}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m. Analiza wyników pokazuje, że większe zagęszczenie materiału skutkuje lepszymi właściwościami mechanicznymi.

Następnie przeprowadzono badania zmęczeniowe, podczas których zastosowano obciążenia jednoosiowe, cyklicznie zmienne. Zerejestrowane parametry to naprężenie i odkształcenie bazy pomiarowej oraz liczba cykli do pęknięcia. Zmienną sterującą było odkształcenie. Z analizy otrzymanych krzywych trwałości zmęczeniowej wynika,

że wraz ze wzrostem porowatości materiału około trzykrotnie maleje trwałość zmęczeniowa próbek dla całego założonego zakresu obciążeń.

Analiza prób zmęczeniowych spieków stali 316L wykazała znaczne zmiany w wyglądzie pętli hiesterezy w trakcie cyklicznego obciążania próbki (rys. 1a).



a) b)

Rys. 1. Pętle histerezy zarejestrowane dla amplitudy odkształcenia ε_a = 0,0035 spieku stali o porowatości 33% (a), wartości modułu Younga dla spieku stali 316L o porowatości 33% (amplituda odkształcenia ε_a = 0,0035) (b)

Przeanalizowano też minimalne i maksymalne wartości obciążenia cyklicznego oraz wartości modułu Younga w całym zakresie obciążania próbek spieków stali 316L z uwzględnieniem trzech stopni porowatości (Rys. 1b). Początkowo wartości obciążeń oraz wartości modułu Younga pozostają niemal bez zmian. Wskutek dalszego obciążania zauważa się spadek maksymalnych wartości naprężeń, a wartości minimalne zmieniają się w niewielkim zakresie. W ten sam sposób zmieniają się wartości modułu Younga. Takie zachowanie może być spowodowane zjawiskiem otwierania się oraz zamykania pęknięć, które powstały wskutek rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Interpretacja otrzymanych wyników badań może być przydatna podczas modelowania rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w próbkach ze spieków stali 316L.

LITERATURA

[1] Kurgan N., Varol R., 2010. Mechanical properties of P/M 316L stainless steel materials. Powder Technology 201, 242-247.
[2] Dewidar M.M., Khalil K.A., Lim J.K., 2007. Processing and mechanical properties of porous 316L stainless steel for biomedical applications. Trans. Nonferrous Metals Society of China 17, 468-473.
[3] Beiss P., Dalgic M., 2001. Structure property relationships in porous sintered steel. Mat. Chemistry and Physics 67, 37-42.
[4] Teoh S.H., 2000. Fatigue of biomaterials: a review. Int. J. Fatigue 22, 825-837.

Pracę wykonano w ramach grantu nr N N501 120536 realizowanego w Politechnice Białostockiej, finansowanego w latach 2009-2012 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Jarosław GAŁKIEWICZ

SYMULACJA PRÓBY ROZCIĄGANIA POŁĄCZENIA SPAWANEGO TYPU 1/2V ZE STALI WYSOKOWYTRZYMAŁEJ (PRZYPADEK *UNDERMATCHING*)

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,
Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

1. WSTĘP

Analiza wytrzymałości połączenia spawanego jest tylko pozornie prostym zadaniem. Uzyskanie akceptowalnych wyników może się okazać niewykonalne ze względu na skomplikowany rozkład własności materiałów w strefie połączenia. Procedura FITNET [1, 2], wykorzystując wcześniejsze doświadczenia specjalistów zajmujących się wytrzymałością połączeń spawanych definiuje zależność między granicą plastyczności materiału podstawowego (MP) a materiału spoiny (MS), wprowadzając współczynnik niedopasowania granicy plastyczności materiału podstawowego i stopiwa (M). Jeśli materiał spoiny ma niższą granicę plastyczności niż materiał podstawowy (tzn. M<1) mówi się o stanie z niższą granicą plastyczności stopiwa (*undermatching*), w przypadku zbliżonych wartości granic plastyczności mowa jest o stanie z równymi granicami plastyczności (*evenmatching*), a jeśli materiał spoiny charakteryzuje się wyższą granicą plastyczności niż materiał łączonych części, to sytuację taką określa się jako stan z wyższą granicą plastyczności (*overmatching*).

W przypadku stanu z niższą granicą plastyczności spoiwa istnieje duże prawdopodobieństwo lokalizacji strefy zniszczenia właśnie w strefie MS. Niestety obszar ten nie jest jednorodny. Dodatkowo na zachowanie połączenia spawanego istotny wpływ ma strefa wpływu ciepła (SWC) [3, 4], w której własności materiału mogą się zmieniać w kierunku grubości połączenia i w kierunku poprzecznym do osi spoiny. Problemem jest również samo ustalenie wymiarów SWC [5].

Przedmiotem pracy jest numeryczna analiza wytrzymałości złącza spawanego w stanie z niższą granicą plastyczności spoiwa. Przedstawiono sposób modelowania złącza spawanego. W pierwszym etapie ustalono empirycznie geometryczne wymiary poszczególnych stref połączenia spawanego. Wykorzystane do tego zostały pomiary geometrii złącza wykonane na wytrawionym zgładzie oraz pomiar twardości i analiza krzywych rozciągania wykonanych z użyciem miniaturowych próbek. W kolejnym etapie ustalone zostały krzywe materiałowe dla MP, MS i materiału w SWC. Materiał w SWC podobnie jak materiał spoiny jest silnie niejednorodny. Analiza dotyczy stanu z niższą granicą plastyczności spoiwa, dlatego zdecydowano się modelować SWC jako materiał jednorodny, opisany przez „uśrednione" wartości. Własności materiałów uzyskano zarówno na podstawie statycznej próby rozciągania dla mikropróbek wyciętych z odpowiednich miejsc w złączu, jak i badając odkształcenia na powierzchni próbki za pomocą sytemu ARAMIS [6] podczas rozciągania gładkiej (o stałym przekroju poprzecznym) próbki zawierającej spoinę. Wyniki uzyskane metodą ARAMISA pozwoliły na określenie lokalnych własności materiału.

Symulacje komputerowe przeprowadzono za pomocą programu ADINA, wykorzystując różne konfiguracje do modelowania próbki. Poprzez analizę porównawczą starano się pokazać korzyści wynikające ze zwiększania dokładności modelu nume-

rycznego. Obliczenia przeprowadzono dla modeli trójwymiarowych oraz modeli płaskich. Praca zakończona jest uwagami dotyczącymi modelowania połączenia spawanego i jego wpływu na uzyskiwane rezultaty.

LITERATURA

[1] Kocak M., Webster S., Janosch J.J., Ainsworth R.A., Koers R. (eds.), 2006. FITNET Report. European Fitness-for-service Network. Edited by Contract No. G1RT-CT-2001-05071.
[2] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J., 2008. Ocena wytrzymałości, trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
[3] Rodgigues D.M., Menezes L.F., Loureiro A., 2004. The influence of the HAZ softening on the mechanical behavior of welded joints containing cracks in the weld metal. Engineering Fracture Mechanics, 71, 2053-2064.
[4] Rodgigues D.M., Menezes L.F., Loureiro A., Fernandes J.V., 2004. Numerical study of the plastic bahaviour in tension of welds in high strength steels. International Journal of Plasticity 20, 1-18.
[5] Zhang Z.L., Hauge M., Thaulow C., Odegard J., 2002. A notched cross wels tensile testing method for detrmining thrue stress-strain curves for weldments. Engineering Fracture Mechanics 69, 353-366.
[6] ARAMIS User Manual, GOM mbH.

Artykuł powstał w ramach grantu N N 501 199640

Jarosław GAŁKIEWICZ, Tadeusz PAŁA, Ihor DZIOBA

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZŁĄCZY SPAWANYCH Z ULTRA WYSOKOWYTRZYMAŁYCH STALI FERRYTYCZNYCH

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn.
Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

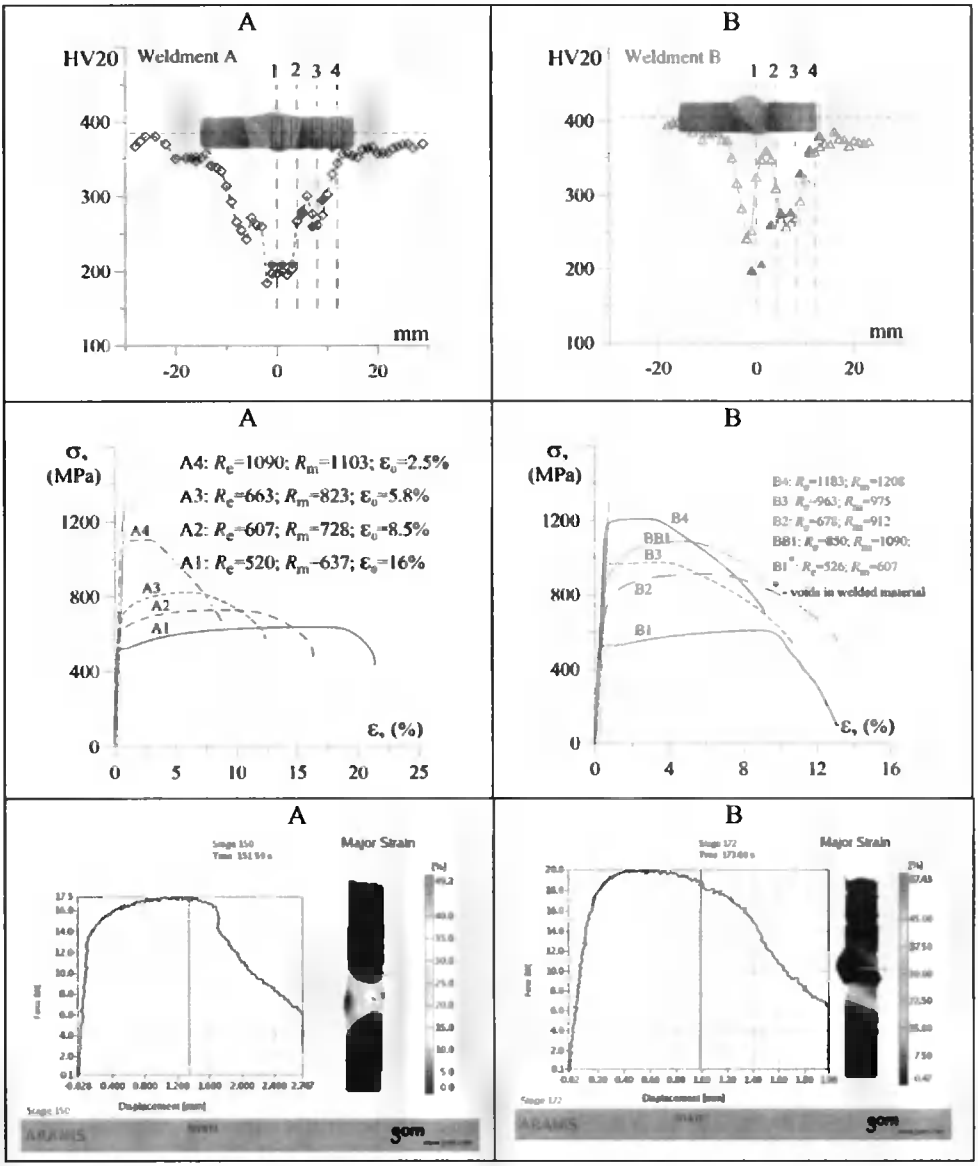
1. WSTĘP

Ultra wysokowytrzymałe stali ferrytyczne (typu HARDOX, OPTIMUM) mają bardzo korzystny zestaw właściwości: wysoki poziom charakterystyk wytrzymałościowych i twardości wraz z wysoką odpornością na pękanie [1, 2], co jest powodem do szerokiego wykorzystywania ich w produkcji elementów konstrukcyjnych. Tak korzystne właściwości stali zapewnia drobnoziarnista martenzytyczno-bainityczna mikrostruktura [3], którą uzyskano w wyniku termomechanicznej obróbki stali [1]. Jednak podczas spawania tych stali powstaje szereg problemów związanych z doborem odpowiedniego spoiwa i technologii, które powinny zapewnić wysoką wytrzymałość złącza.

W artykule przedstawiono wyniki badań dwóch złączy spawanych, wykonanych wg różnych technologii spawania. Przeprowadzono pomiary twardości, wyznaczono charakterystyki wytrzymałościowe i odporności na pękanie materiału z różnych stref złączy spawanych. W celu identyfikacji obszarów o najniższej wytrzymałości próbki ze spoinami poddano rozciąganiu. Za pomocą wideo systemu ARAMIS 5M zarejestrowano pole przemieszczeń i ustalono rozkłady odkształceń w odpowiednich strefach złączy spawanych. Uzyskane wyniki stanowią bazę dla zaawansowanych obliczeń numerycznych.

2. WYNIKI BADAŃ

Badano dwa złącza, A i B, wykonane z materiału OPTIMUM 960QC. Podczas spawania w złączu A liniowa energia spawania była równa 1,2 $kJ \cdot mm^{-1}$, w złączu B – 0,7 $kJ \cdot mm^{-1}$. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 1. W złączu A najniższy poziom twardości występuje w materiale spoiny (MS), w strefie wpływu ciepła (SWC) twardość wzrasta do poziomu właściwego materiału rodzimemu (MR). MS posiada najniższy poziom charakterystyk wytrzymałości, w MS występuje najwyższy poziom odkształceń podczas obciążenia i rozpoczyna się proces zniszczenia. W złączu B twardość i charakterystyki wytrzymałościowe MS są podobne do MR. Niski poziom twardości i charakterystyk wytrzymałościowych obserwowano w SWC. W tym obszarze również występuje najwyższy poziom odkształceń i stąd zaczyna się zniszczenie złącza spawanego.



Rys. 1. Rozkład twardości, krzywe rozciągania oraz analiza odkształceń w złączu A i B

LITERATURA

[1] Porter D. 2006. Developments in hot-rolled high strength structural steel. Nordic welding conference 06. New trends in welding technology, Tampere Finland.
[2] Neimitz A., Dzioba I., Limnell T. Master Curve of ultra high strength steel.
[3] International Journal of Pressure Piping and Vessel, 89; 2012; (in print).
[4] Bhadeshia H.K.D.H., 2001. Bainite in Steels. Institute of Materials. London.

Piotr GARBACZ, Wojciech MIZAK

METODA KALIBRACJI W DWUKAMEROWYM SYSTEMIE WIZYJNYM DO OBSERWACJI PROCESÓW ZMĘCZENIOWYCH

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

1. STRESZCZENIE

Wraz z rozwojem technologii optoelektronicznych bezkontaktowe metody wizyjne do obserwacji procesów zmęczeniowych materiałów są coraz szerzej stosowane w badaniach eksperymentalnych. Jedną z metod należącą do tej grupy, wykorzystującą dwukamerowy system wizyjny, umożliwiający pomiary 3D jest stereowizja. Charakteryzuje się ona dużą szybkością działania, a także możliwością zastosowań zarówno w skali mikro, jak i makro. Warunkiem jej stosowania w badaniach zmęczeniowych jest prawidłowe wykonanie procesu kalibracji parametrów zewnętrznych i wewnętrznych kamer, który ma bezpośredni wpływ na niepewność przeprowadzonych pomiarów.

Zagadnienie kalibracji w systemie dwukamerowym było podejmowane przez wielu badaczy. Proces ten polega na odnalezieniu parametrów projekcji łączących ze sobą położenie znanych punktów w przestrzeni 3D i ich obrazów na płaszczyznach ogniskowania kamer. Istniejące rozwiązania można podzielić na metody auto-kalibracji i kalibracji z wykorzystaniem odpowiedniego wzorca. Pierwsza grupa metod zakłada wykorzystanie informacji zawartych bezpośrednio w analizowanych obrazach, co pozwala na łatwe zautomatyzowanie tego procesu. Podejście takie obarczone jest jednak większym ryzykiem błędów. Znacznie lepsze rezultaty mogą być uzyskane za pomocą metod wykorzystujących specjalne wzorce kalibracyjne. W tym przypadku wyróżnić można metody bazujące na wzorcach płaskich lub przestrzennych.

W artykule omówione zostały metody kalibracji systemów stereowizyjnych. Przedstawiona została koncepcja systemu umożliwiającego automatyzację procesu kalibracji dla układu dwukamerowego, wyposażonego w mechatroniczny moduł pozycjonowania przestrzennego kamer, który instalowany jest na maszynie wytrzymałościowej.

Tomasz GIESKO

DWUKAMEROWY SYSTEM MONITOROWANIA PROCESÓW ZMĘCZENIOWYCH

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Bydgoszcz

W artykule zaprezentowano opracowany system monitorowania procesów destrukcji zmęczeniowej, w którym zastosowano dwukamerowy układ obserwacji. W skład struktury systemu wchodzą podsystem wizyjny, zespół pozycjonowania kamer oraz podsystem informatyczny. Moduły wizyjne są zamocowane na zespołach pozycjonujących 4DOF, co umożliwia swobodne ustalanie położenia kamery względem próbki. Zastosowanie zmotoryzowanych obiektywów pomiarowych o zmiennej konfiguracji umożliwia adaptację systemu do różnych skal obserwacji procesu zmęczeniowego na powierzchni próbki poprzez zmianę odległości obserwacji i kąta widzenia. Automatyczne ustawiania ostrości jest realizowane z wykorzystaniem zaimplementowanego algorytmu. Opracowana platforma informatyczna umożliwia analizę pęknięć zmęczeniowych dla dwóch torów wizyjnych 2D lub dla obrazu stereowizyjnego.

Grzegorz GOLAŃSKI*, Stanisław MROZIŃSKI, Krzysztof WERNER*****

NISKOCYKLOWA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA MARTENZYTYCZNEGO STALIWA PO STARZENIU

* Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Materiałowej,
ul. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa
** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz
*** Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa,
ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa

1. WPROWADZENIE

Komponenty bloków energetycznych wykonane z odlewów staliwnych narażone są podczas rozruchu i odstawiania bloku na oddziaływanie zmiennych obciążeń cieplnych, jak również mechanicznych często przekraczających granicę plastyczności. Wielokrotne cykliczne zmiany temperatury i obciążeń po pewnej określonej liczbie cykli mogą prowadzić do zniszczenia materiału. Zniszczenie materiału ma charakter zbliżony do zmęczenia niskocyklowego. Uszkodzenia masywnych wielotonowych odlewów staliwnych w wyniku niskocyklowego zmęczenia, stanowią ok. 65% wszystkich uszkodzeń turbin parowych [1, 2].

Podstawowym wymogiem stawianym stalom/staliwom żarowytrzymałym stosowanym w przemyśle energetycznym jest zachowanie przez długi okres eksploatacji stabilnej mikrostruktury, a tym samym, określonych właściwości mechanicznych. Oddziaływanie temperatury i czasu, także w warunkach pełzania naprężenia, jest przyczyną zmian zachodzących w mikrostrukturze wysokochromowych staliw, co skutkuje również zmianami w ich właściwościach, w tym właściwościach cyklicznych [2].

Obecnie zarówno w kraju, jak i na świecie dąży się do budowy całościowych charakterystyk określających przydatność i potencjalne zastosowanie stali i staliw żarowytrzymałych. W tym celu niezbędne są odpowiednie charakterystyki, m.in. charakterystyki zmęczeniowe nowych gatunków stali i staliw, uwzględniające stopniowe obniżanie się właściwości w czasie eksploatacji. W pracy przedstawione zostaną porównane wyniki badań trwałości zmęczeniowej w zakresie niskocyklowym staliwa GX12CrMoVNbN9 – 1 w stanie wyjściowym oraz po 8000 godzin starzenia w temperaturze 600°C.

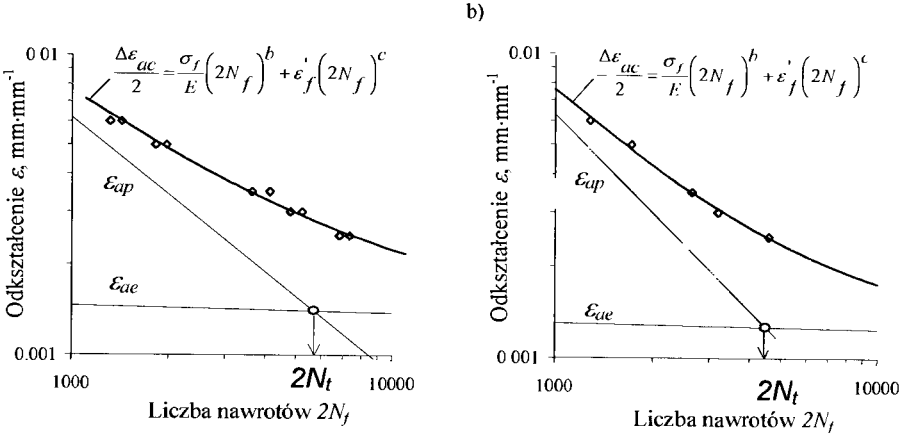
2. OPIS BADAŃ

Materiałem do badań było wysokochromowe, martenzytyczne staliwo GX12CrMoVNbN9 – 1 w stanie wyjściowym (po obróbce cieplnej) oraz po 8000 godzin starzenia w temperaturze 600°C. Niskocyklowe zmęczenie przeprowadzono na pięciu poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac} = 0,25; 0,30; 0,35; 0,50; 0,60% w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego (ε_{ac} = const). Badania zmęczeniowe przeprowadzono w temperaturze 600°C. Częstotliwość obciążenia f wy-

nosiła 0,2 Hz. Podczas badań rejestrowano wartości chwilowe siły obciążającej oraz odkształcenia próbki dla kolejnych cykli obciążenia.

3. WYNIKI BADAŃ

Badany materiał charakteryzował się zarówno w stanie wyjściowym, jak i po starzeniu cyklicznym osłabieniem. Na rysunku 1 przedstawiono wykresy trwałości zmęczeniowej badanego staliwa w stanie wyjściowym i po starzeniu.



Rys. 1. Wykresy trwałości zmęczeniowej staliwa GX12CrMoVNbN9-1: a) w stanie wyjściowym; b) po 8000 godzin starzenia w temperaturze 600°C

Analiza uzyskanych charakterystyk (rys. 1) wskazuje, że odcięta $2N_t$ punkt przecięcia wykresów $\varepsilon_{ae} = f(2N_t)$ i $\varepsilon_{ap} = f(2N_t)$ w obydwu przypadkach leży w zakresie małej liczby cykli. Wartość liczny nawrotów $2N_t$ dla materiału starzonego była ok. 20% niższa od tej wartości dla materiału w stanie wyjściowym. Trwałość zmęczeniową w obu analizowanych przypadkach opisano równaniem Mansona-Coffina. Współczynniki tego równania dla starzonego staliwa uległy obniżeniu, z wyjątkiem współczynnika ε'_f, którego wartość wzrosła.

LITERATURA

[1] Viswanathan R., 1989. Damage mechanisms and life assessment of high temperature components. ASM International, Metals Park Ohio, USA.
[2] Junak G., Cieśla M., 2011. Wpływ obciążeń stopniowanych na trwałość niskocyklową stosowanych w energetyce stali P91 i P92. Inżynieria Materiałowa 5, 862-867.

Praca naukowa finansowana ze środków MNiE na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr N N507 510 838.

Czesław GOSS, Paweł MARECKI

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ STALI S960QL I JEJ POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

1. WSTĘP

W artykule zaprezentowano wyniki prób statycznego rozciągania oraz wyniki badań zmęczeniowych materiału rodzimego i płaskich próbek spawanych wykonanych ze stali S960QL. Przedstawiono również wyniki pomiarów naprężeń własnych w połączeniu spawanym czołowym. Dokonano zestawienia porównawczego wartości współczynnika spiętrzenia naprężeń α_k wyznaczonych metodą elementów skończonych i metodami Jewdokimowa oraz Lawrance'a.

2. WYNIKI BADAŃ STATYCZNYCH

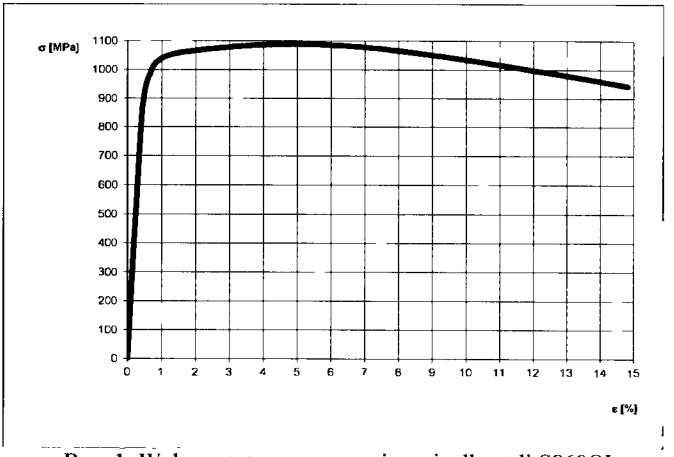
W celu określenia podstawowych właściwości badanego materiału przeprowadzono w pierwszej kolejności próby statycznego rozciągania próbek płaskich. Próbki wykonano zgodnie z normą. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny, a na rysunku 1 przykładowy wykres statycznego rozciągania badanej stali. Tabela 2 przedstawia wartości średnie uzyskane podczas badań.

Tabela 1. Skład chemiczny (analiza wytopu) stali S960QL

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,18	0,50	1,60	0,02	0,01	0,80	0,60	2,00	0,10

Tabela 2. Wartości średnie wyników prób statycznego rozciągania

$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	R_u [MPa]	A [%]	Z [%]	E [GPa]
1000	1090	2209	14	38	208



Rys. 1. Wykres statycznego rozciągania dla stali S960QL

3. WYNIKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

W celu uzyskania pełnej charakterystyki stali przeprowadzone zostały badania zmęczeniowe w pełnym zakresie liczby cykli. Umożliwiło to uzyskanie wykresu Wöhlera obejmującego także zakres wysokocyklowy.

Wykonano również pomiary naprężeń własnych w spoinach. Pomiary przeprowadzono metodą rentgenograficzną na dyfraktometrze STRAINFLEX PSF-2M firmy Rigaku.

4. OKREŚLENIE WSPÓŁCZYNNIKA SPIĘTRZENIA NAPRĘŻEŃ α_K

4.1. Określenie współczynnika kształtu metodą obliczeń

Do określenia współczynnika kształtu na drodze obliczeń posłużono się metodą Lawrance'a oraz metodą Jewdokimowa.

4.2. Określenie współczynnika kształtu na drodze analizy numerycznej

Rozkłady naprężeń uzyskano za pomocą przeprowadzonego modelowania numerycznego. Na tej podstawie określono współczynnik spiętrzenia naprężeń α_k: od strony grani spoiny - $\alpha_k = 1{,}20$, od strony lica spoiny – $\alpha_k = 1{,}08$.

Uzyskano wartości niższe niż uzyskane metodami obliczeniowymi.

5. PODSUMOWANIE

Stal S960QL wykazuje cykliczne umocnienie z tendencją do szybkiej stabilizacji. Dotyczy to zarówno próbek wykonanych z materiału rodzimego, jak i próbek ze spoiną czołową. Podczas badania przy obciążeniu odzerowo-tętniącym o stałej wartości naprężenia σ_{max} wykazano zmniejszanie się szerokości pętli histerezy i amplitudy odkształcenia plastycznego. Na podstawie badań próbek spawanych stwierdzono zmniejszenie się ich trwałości o około 60% w porównaniu do próbek z materiału rodzimego. Tendencja taka utrzymuje się także w zakresie wysokocyklowym.

Zbigniew GÓRSKI, Jakub KOWALSKI

PROPOZYCJA PROCEDUR DLA SPRAWDZANIA WYTRZYMAŁOŚCI STATYCZNEJ I TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI KADŁUBA STATKU

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Projektowanie wytrzymałościowe konstrukcji kadłubów statków opiera się w dużej mierze na doświadczeniu zebranym przez towarzystwa klasyfikacyjne, takie jak: LLoyd's Register of Shipping, Det Norske Veritas Germanischer Lloyd czy Polski Rejestr Statków. Doświadczenia te uwzględniane są w zmieniających się przepisach, które, w przypadku masowców i tankowców, zostały ujednolicone w tzw. Common Structural Rules (CRS) przez towarzystwa klasyfikacyjne wchodzące w skład IACS. CSR zawierają wytyczne, na podstawie których należy szacować wytrzymałość kadłuba zarówno na obciążenia statyczne (powstałe na skutek ciśnień wody zaburtowej, ładunku, balastu itp.), dynamiczne czy też trwałość zmęczeniową. Ponadto przepisy podają standardowy plan inspekcji dla już zbudowanych statków dla remontów potwierdzających klasę statku tj. remontów rocznych i pośrednich (co 2. lub 3. remont roczny) oraz remontów dla odnowienia klasy (tzw. przegląd 5-letni). Zakres każdego typu remontu dodatkowo zależy od typu i wieku statku, rodzaju przewożonego ładunku, rejonu eksploatacji oraz stanu technicznego statku określonego na podstawie oględzin ogólnych i szczegółowych. Oględziny szczegółowe (tzn. takie, w trakcie których konstrukcja kadłuba statku znajduje się w zasięgu ręki dokonującego oględziny inspektora) wymagają kosztownego i czasochłonnego wydokowywania statku. Drogą wiodącą do obniżenia kosztów remontu, niezmniejszającą bezpieczeństwa statków, jest zmiana (wydłużenie) interwałów remontowych statku. Praktyczna realizacja tego postulatu będzie możliwa, gdy zaakceptowane zostaną metody przewidywania stanu technicznego statku. Określany jest on na podstawie o opracowanych modeli niezawodnościowych, a także informacji pochodzących z tzw. Centralnej Bazy Danych Statystycznych (CSD) dotyczące ubytków korozyjnych i rozwoju pęknięć zmęczeniowych w powiązaniu z informacjami o przebytych przez statek trasach oraz trasach prognozowanych. Wytrzymałość statyczną i dynamiczną analizowanego kadłuba statku wyznacza się, rozwiązując model MES. Wyniki obliczeń, takie jak: wytrzymałość ogólna kadłuba statku i trwałość zmęczeniowa poszczególnych węzłów są sprawdzane przez obliczenia opierające się na przepisach towarzystw klasyfikacyjnych.

W opracowaniu przedstawione zostaną założenia programu sprawdzającego i ewolucja jego kształtowania. Omówione zostaną kolejne wersje algorytmu obliczeniowego zrealizowanego w formie modułu opracowywanego przez Politechnikę Gdańską w ramach większego programu komputerowego budowanego przez konsorcjum europejskie w ramach projektu RISPECT (VII PR UE). Zaprezentowane zostanie również usytuowanie modułu w całości programu, jego ograniczenia oraz współdziałanie z innymi elementami systemu zawartymi w bazie danych oraz pozostałych modułach. Przedstawione zostaną ponadto możliwości zastosowania uzyskanych wyników w innych, poza okrętowych dziedzinach.

Zbigniew GÓRSKI, Janusz KOZAK

ZAGADNIENIA NISZCZENIA ZMĘCZENIOWEGO KONSTRUKCJI KADŁUBA STATKU JAKO ELEMENT OKREŚLANIA POZIOMU RYZYKA W PLANOWANIU EKSPLOATACJI STATKU

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Uszkodzenia konstrukcji statków w przeciwieństwie do konstrukcji lądowych są dość częste i niosą za sobą ryzyko utraty życia marynarzy, katastrof ekologicznych oraz wysokich kosztów ekonomicznych z tym związanych. W trakcie eksploatacji statki poddawane są oddziaływaniu agresywnego środowiska oraz różnorakim obciążeniom zmiennym wywołującym: zjawiska korozji oraz zmiany zmęczeniowe skutkujące obniżaniem się własności wytrzymałościowych konstrukcji, których utrzymanie na wymaganym poziomie jest podstawowym wymogiem z punktu widzenia ich bezpiecznej eksploatacji. Wiąże się to z koniecznością przeprowadzania regularnych inspekcji i napraw uszkodzonych (korozja, zmęczenie) obszarów konstrukcji kadłuba. W chwili obecnej zarówno planowanie remontów, jak i projektowanie konstrukcji nowych statków bazuje na długoletnich doświadczeniach (szczególnie Towarzystw Klasyfikacyjnych), które to określają wymagania w stosunku do konstrukcji okrętowych w sposób ogólny, bez uwzględniania potrzeb konkretnego statku. Metody planowania remontu bazujące na określaniu ryzyka wystąpienia uszkodzeń i niezawodności konstrukcji stosowane w innych gałęziach przemysłu nie znajdują bezpośredniego zastosowania w okrętownictwie – jak do tej pory nie stosuje się wykorzystania informacji z dużej liczby statków w celu poprawy planowania kontroli i remontu danego statku. Metodologia projektu jest wynikiem ewaluacji polegającej na połączeniu dwóch pozornie różnych metod planowania kontroli (inspekcji) statków (poniżej przedstawionych), co pozwoli na podejmowanie bardziej skutecznych decyzji. Metodami, o których mowa, są:

– inspekcje – interwały czasowe ich przeprowadzania oraz metody projektowania statków bazują na wieloletnich doświadczeniach i przede wszystkim zdeterminowane są przepisami Towarzystw Klasyfikacyjnych i tym samym powinny być ulepszane; plany remontów statków z reguły są te same dla wszystkich statków; wyjątkowo, jeśli pojawiają się poważne problemy na jednym z remontowanych statków, Towarzystwo Klasyfikacyjne może rozszerzyć zakres inspekcji (kontroli) określonego statku lub statków siostrzanych; tradycyjna metoda ma tę zaletę, że opiera się na wynikach przeglądu statku, jednakże wyników tych nie można przenosić na statki o zmienionej konstrukcji lub innym przeznaczeniu,

– metody niezawodnościowe – stosuje się bardzo rzadko w celu określenia poziomu stopnia niezawodności statku w powiązaniu z wykorzystaniem tych obliczeń do określania zakresu niezbędnego remontu statku; jeszcze rzadziej określa się początkowe wymagania projektowe.

Metody te do tej pory były stosowane z sukcesem do określania wymagań w stosunku do poszczególnych elementów konstrukcji statku, ale nie dają one wiarygodnych informacji o niezawodności statku jako całości, co wynika z obaw, że „doświadczalne bazy danych" tworzone przez tradycyjną metodologię użyte do obliczeń niezawodności są niewiarygodne, ponieważ nie są zweryfikowane (wykalibrowane) poprzez wyniki

praktyczne. W pracy przedstawione zostanie podejście polegające na połączeniu obu wyżej przedstawionych metod w jedną całość w celu podejmowania bardziej racjonalnych decyzji bazujących na kombinacji danych doświadczalnych w połączeniu z zastosowaniem metod statystycznych. Pozwoli to na określenie bezpiecznych, kosztowo efektywnych interwałów i obszarów inspekcji konstrukcji statku, określaniu zakresu remontu oraz doskonalenia zasad projektowania istniejących statków.

Przedstawione wyniki stanowić będą rezultaty prac prowadzonych w ramach projektu RISPECT (*Risk-Based Expert System for Through – Life Ship Structural Inspection and Maintenance and New-Build Ship Structural Design*) realizowanego w ramach VII PR UE.

Marcin GRABA

ROZSZERZENIE KONCEPCJI OCENY OBCIĄŻEŃ GRANICZNYCH NA PRZYPADKI TRÓJWYMIAROWE DLA ROZCIĄGANEJ PŁYTY Z CENTRALNĄ SZCZELINĄ

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,
Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

W pracy przedstawiono rozszerzenie metody wyznaczania obciążeń granicznych w elementach konstrukcyjnych zawierających szczelinę centralną i poddawanych jednoosiowemu rozciąganiu na przypadki trójwymiarowe. Literatura naukowa podaje jedynie rozwiązania (otrzymane na podstawie rozważań analitycznych i numerycznych) ograniczone wyłącznie do płaskiego stanu naprężeń lub odkształceń - procedury EPRI [1], SINTAP [2], FITNET [3]. Efektem pracy jest propozycja wzorów pozwalających obliczyć obciążenie graniczne z uwzględnieniem grubości elementu konstrukcyjnego, które będą mniej konserwatywne i nieograniczone wyłącznie do przypadków dwuwymiarowych.

Zaprezentowane w pracy rezultaty mogą znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu problemów inżynierskich, między innymi przy analizie wytrzymałości elementów konstrukcyjnych zawierających defekty z wykorzystaniem diagramów zniszczenia FAD lub CDF [3, 4].

LITERATURA

[1] Kumar V., German M.D., Shih C.F., 1981. An engineering approach for elastic-plastic fracture analysis. Electric Power Research Institute, Inc. Palo Alto, CA (1981), EPRI Report NP-1931.
[2] SINTAP, 1999. SINTAP: Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry. Final Procedure. Brite-Euram Projest No BE95-1426. – Rotherham: British Steel
[3] FITNET Report, 2006. (European Fitness-for-service Network). Edited by M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers, Contract No. G1RT-CT-2001-05071.
[4] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J., 2008. The assessment of the strength and safety of the operation high temperature components containing crack, Kielce University of Technology Publishing House.

Marcin GRABA

WERYFIKACJA HYBRYDOWYCH ROZWIĄZAŃ DO OSZACOWANIA CAŁKI J WG PROCEDUR EPRI DLA WYBRANYCH GEOMETRII

Politechnika Świętokrzyska. Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,
Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

W pracy przedstawiono weryfikację podanych w 1981 roku w procedurach EPRI [1] hybrydowych rozwiązań pozwalających oszacować wartość całki J dla geometrii zawierającej pęknięcie, bez konieczności prowadzenia żmudnych obliczeń MES. Zaprezentowano krótki rys historyczny dotyczący sprężysto-plastycznej mechaniki pękania, począwszy od rozwiązania HRR [2, 3], a także podano przybliżone rozwiązania wykorzystywane do oszacowania całki J.

Omówiono wykorzystany w realizacji pracy program obliczeń numerycznych, które prowadzono z wykorzystaniem próbek trójpunktowo zginanych SEN(B) w programie ADINA [4, 5], przedyskutowano uzyskany wynik obliczeń, zweryfikowano rozwiązania podane w procedurach EPRI [1], po czym zaprezentowano nowy wzór pozwalający oszacować wartość całki J bez konieczności prowadzenia obliczeń MES, przy założeniu, że obliczenia MES prowadzono zgodnie z zaleceniami podanymi w [6-9], które gwarantują zbieżność uzyskiwanych rezultatów.

Zaprezentowane w pracy rezultaty mogą znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu problemów inżynierskich, między innymi przy oszacowaniu odporności na pękanie lub przy analizie zniszczenia z wykorzystaniem diagramów CDF [10, 11].

LITERATURA

[1] Kumar V., German M.D., Shih C.F., 1981. An engineering approach for elastic-plastic fracture analysis. Electric Power Research Institute, Inc. Palo Alto, CA (1981), EPRI Report NP-1931.
[2] Hutchinson J.W., 1968. Singular Behavior at End of Tensile Crack in Hardening Material. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 16(1), 13-31.
[3] Rice J.R., Rosengren G.F., 1968. Plane Strain Deformation Near Crack Tip in Power-Law Hardening Material. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 16(1), 1-12.
[4] ADINA 8.7.3: ADINA: Theory and Modeling Guide - Volume I: ADINA, Report ARD 08-7, ADINA R&D, Inc., 2008.
[5] ADINA 8.7.3: ADINA: User Interface Command Reference Manual - Volume I: ADINA Solids & Structures Model Definition, Report ARD 08-6, ADINA R&D, Inc., 2008.
[6] Brocks W., Cornec A., Scheider I., 2003, Computational Aspects of Nonlinear Fracture Mechanics. Bruchmechanik, GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht, Germany, Elsevier, pp. 127-209.
[7] Brocks W., Scheider I., 2003. Reliable J-Values. Numerical Aspects of the Path-Dependence of the J-integral in Incremental Plasticity. Bruchmechanik, GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht, Germany, Elsevier, pp.127-209.
[8] Graba M., Gałkiewicz J., 2007. Influence of the Crack Tip Model on Results of the Finite Element Method. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 45(2), pp. 225-237.

[9] Graba M., 2009. Numerical analysis of the mechanical fields near the crack tip in the elastic-plastic materials. 3D problems. Kielce University of Technology.
[10] FITNET Report, 2006. (European Fitness-for-service Network). Edited by M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth. R. Koers, Contract No. G1RT-CT-2001-05071.
[11] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J., 2008. The assessment of the strength and safety of the operation high temperature components containing crack. Kielce University of Technology Publishing House.

**Volodymyr HUTSAYLYUK*, Lucjan ŚNIEŻEK*,
Mykola CZAUSOW**, Andriy PYLYPENKO****

BADANIE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH STOPU ALUMINIUM 2024-T3 PRZY ODKSZTAŁCENIU STATYCZNYM W WARUNKACH OBCIĄŻENIA ZŁOŻONEGO

* Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny,
ul. Gen. S. Kaliskiego 2 bud.62, 00-908 Warszawa
** Narodowy Uniwersytet Bioresursów i Wykorzystania Natury Ukrainy,
Wydział Mechaniczno-Technologiczny, ul. Geroiiw Oborony No 12, 03041, Kijów

W rzeczywistych warunkach eksploatacji konstrukcji inżynierskich materiał, z którego zostały one wytworzone podlega różnego rodzaju obciążeniom zewnętrznym. Zgodnie z zasadami fizyki konstrukcja czy materiał, dążą do kompensacji wpływów zewnętrznych, inaczej mówiąc, dążą do stanu równowagi.

Jednak w rzeczywistości osiągnięcie stabilnego stanu równowagi jest prawie niemożliwe na skutek ciągłych zmian obciążenia zewnętrznego. Faktycznie obiekt badań przebywa w stanie równowagi względnej i staje się bardzo czuły na jakiekolwiek dodatkowe obciążenia. Oddziaływanie dodatkowego obciążenia w trakcie obciążenia głównego powoduje zmianę stanu równowagi względnej na stan niezrównoważony.

Zmianę własności mechanicznych materiału w tym stanie najlepiej daje się opisać z wykorzystaniem zasad mechaniki chaosu.

Według teorii stanu niezrównoważonego oraz samoorganizacji rozbudowanej przez Prygożyna i współpracowników [1, 2], zakłada się, że impulsowe obciążenie systemu mechanicznego (materiału) powoduje jego adaptację do nowego stanu poprzez powstanie nowej, uporządkowanej struktury (stanu materiału). Struktura ta powstaje w wyniku niezrównoważonych przejść fazowych, które są z kolei wynikiem zmiany parametrów sterujących (odciążenia). Oczywiście własności mechaniczne materiału o takiej strukturze będą inne.

Jest to istotne szczególnie w przypadku konstrukcji, które są obliczane na obciążenia statyczne, a w trakcie eksploatacji mogą być dodatkowo obciążone siłą o charakterze impulsowym.

Dodatkowe obciążenie impulsowe, w zależności od prędkości przyłożenia i zakresu zmęczenia materiału rodzimego, może powodować zarówno natychmiastowe niszczenie, jak i zwiększenie plastyczności materiału, co przekłada się pozytywnie na ogólny resurs eksploatacji konstrukcji.

Badania zjawiska uplastycznienia materiału wymagają odpowiednio zaprojektowanego stanowiska dla realizacji gwałtownych zmian obciążenia dodatkowego w trakcie realizacji obciążenia zasadniczego. W artykule [3] autorzy zaproponowali konstrukcję uniwersalnego stanowiska badawczego oraz opracowali ogólną metodykę badań doświadczalnych dla szerokiego zakresu materiałów.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych zmian własności mechanicznych stopu aluminium 2024-T3 w warunkach obciążenia złożonego.

Wybrany stop aluminium jest szeroko wykorzystywany w lotnictwie na elementy głównych węzłów konstrukcji samolotu. W trakcie eksploatacji materiał ten podlega wpływowi różnego rodzaju obciążeń, w tym obciążeń o charakterze impulsowym.

Celem prezentowanych badań jest ocena zmian własności mechanicznych stopu aluminium 2024-T3 przy oddziaływaniu impulsowych obciążeń dodatkowych w warunkach rozciągania statycznego, jako zasadniczego obciążenia konstrukcji.

Część próbek płaskich ze stopu aluminium 2024-T3 o szerokości części roboczej 10 mm oraz grubości 3 mm, poddano deformacji w warunkach osiowego rozciągania. W trakcie osiągania określonego poziomu odkształcenia próbki dodatkowo poddawano obciążeniu impulsowemu. Impuls ten był realizowany w zakresie sprężystych i niesprężysto-plastycznych odkształceń badanych elementów.

Druga część próbek była deformowana w warunkach osiowego rozciągania do tego samego poziomu odkształcenia przy minimalnej prędkości ε=1 mm/s.

Wszystkie badane próbki, deformowane do określonego poziomu w każdej serii, doprowadzano do zniszczenia przy statycznym obciążeniu z prędkością deformowania ε=10 mm/s. Celem tego badania było ujawnienie stanu granicznego samoorganizacji struktury materiału, w trakcie dynamicznych procesów niezrównoważonych, wywołanych przez dodatkowe obciążenia impulsowe. Wynikiem tego może być zwiększenie własności mechanicznych materiału na makro poziomie, albo gwałtowny ich spadek, aż do pełnego niszczenia materiału.

Przy porównaniu wyników badań dwóch serii próbek ujawniono wysoką czułość własności mechanicznych stopu aluminium 2024-T3 na dynamiczne procesy niezrównoważone.

W zależności od poziomu poprzedniego statycznego odkształcenia, przy którym realizowano obciążenia impulsowe o różnej intensywności, istnieje możliwość gwałtownego uplastycznienia stopu. Wzrost odkształcenia plastycznego, w niektórych przypadkach, sięgał 40%.

Szczególne zainteresowanie budzi ujawniony podczas przeprowadzonych w temperaturze pokojowej prób statycznego rozciągania próbek po realizacji jednorazowych, impulsowych obciążeń o różnej intensywności efekt uplastycznienia stopu aluminium 2024-T3.

LITERATURA

[1] Nikolas G., Prigożin I., 2003. Poznanie skomplikowanego. Wstęp / Tlum. z ang. Wyd. 2-e. typowe, Edytorial URSS, Moskwa.
[2] Prigożin I., 2002. Od istniejącego do powstającego. Czas i komplikacje w naukach fizycznych. Tlum. z ang. Wyd. 2-e. uzup., Edytorial URSS, Moskwa.
[3] Czausow M., Wojtjuk D., Pylypenko A., Kuźmenko A., 2004. Stanowisko do badań materiałów z zapisem pełnego wykresu niszczenia, Problemy Procznosci 5, 117-123.

Jacek JACKIEWICZ

MODELOWANIE ROZWOJU PĘKNIĘĆ W STALACH

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. OPIS FIZYCZNY ROZWOJU PĘKNIĘĆ W STALACH

Zdolność stali do odkształcania plastycznego w sąsiedztwie wierzchołka pęknięcia zapobiega rozprzestrzenianiu się w niej pęknięcia kruchego. Pękanie kruche jest definiowane jako pękanie zachodzące przy bardzo małych odkształceniach plastycznych, gdy naprężenie średnie przenoszone przez materiał jest mniejsze od granicy plastyczności.

Podczas pękania ciągliwego stali wytrzymałość na rozciąganie jest mniejsza od naprężenia koniecznego do rozprzestrzeniania się pęknięcia, dlatego odkształca się ona najpierw plastycznie, powodując zarodkowanie, a następnie wzrost pustek. W przypadku gdy większość cząstek drugiej fazy, na których tworzą się pustki, znajduje się na granicach ziaren, to pękanie zachodzi wzdłuż granic tych ziaren i jest nazywane międzykrystalicznym. Jeśli natomiast rozmieszczenie cząstek drugiej fazy jest względnie równomierne, to pękanie zachodzi przez ziarna i jest nazywane transkrystalicznym.

W stalach o strukturze krystalicznej sieci regularnej przestrzennie centrowanej (RPC), np. stalach ferrytycznych, naprężenia poślizgu Peierlsa rosną z obniżeniem temperatury, co powoduje wzrost granicy plastyczności w niskich temperaturach. Metale charakteryzujące się silną zależnością granicy plastyczności od temperatury, a także szybkości odkształcenia wykazują skłonność do pękania kruchego. W materiałach o strukturze regularnej ściennie centrowanej (RSC), w których odległości międzypłaszczyznowe są najmniejsze, naprężenia poślizgu Peierlsa są małe. Zależność granicy plastyczności tych materiałów od temperatury jest słaba, dlatego materiały te mogą być stosowane w warunkach kriogenicznych.

Modelowanie sekwencyjnego rozwoju pęknięć wymaga zastosowania przyrostowego sformułowania równań wyjściowych. Podczas rozwiązywania problemów z wykorzystaniem metody elementów skończonych buduje się układy równań, w których macierze współczynników odwzorowują relacje między węzłami siatki dyskretyzacyjnej. Uwzględnienie przyrostu powierzchni pęknięcia w modelu numerycznym wymaga zwiększenia liczby elementów skończonych. Wraz ze wzrostem liczby elementów rośnie również liczba równań. Stosując w programach obliczeniowych macierze do przechowywania współczynników układu równań, obserwuje się silny wpływ szerokości pasma macierzy na czas obliczeń i wielkość zajętej pamięci komputera. W praktyce trudno jest osiągnąć optymalną numerację węzłów w siatkach dyskretyzacyjnych, których budowa ulega zmianie po uwzględnieniu kolejnego przyrostu powierzchni pęknięcia. Stosowanie algorytmu renumeracji węzłów o najniższej różnicy numerów kolejnych węzłów odwrotną metodą Cuthilla-McKee'a ma sens tylko dla wyjściowej postaci modelu numerycznego.

2. BEZPOŚREDNIE I ITERACYJNE METODY ROZWIĄZYWANIA RÓWNAŃ LINIOWYCH WYKORZYSTYWANE DO MODELOWANIA ROZWOJU PĘKNIĘĆ

Modelowanie rozwoju pęknięć w stalach za pomocą metody elementów skończonych wymaga rozwiązywania układów równań liniowych z macierzami rzadkimi, które zawierają dostatecznie dużo elementów zerowych.

Metody bezpośrednie, które wykorzystują dekompozycję Gaussa i Choleskiego, dają rozwiązanie ze skończoną liczbą kroków. Podstawową niedogodnością stosowania metod bezpośrednich dla macierzy rzadkich jest pojawienie się podczas obliczeń nowych, niezerowych elementów w tych macierzach (*fill in*).

Metody iteracyjne polegają na iteracyjnym ulepszaniu przybliżonego rozwiązania do momentu osiągnięcia zadawalającej dokładności. W każdym kroku wykorzystywana jest stosunkowo prosta procedura bazująca na iloczynie macierzy przez wektor, która nie zmienia postaci macierzy układu równań liniowych. Pozwala to zmniejszyć wymagania w stosunku do pamięci operacyjnej w porównaniu z metodami bezpośrednimi oraz lepiej wykorzystać specyficzną strukturę macierzy rzadkich. Dzięki zastosowaniu uwarunkowania wstępnego (*preconditioning*) udaje się zmniejszyć wymaganą liczbę iteracji. Duże układy równań, które zwykle charakteryzują się rzadkimi macierzami współczynników, rozwiązuje się przeważnie przy użyciu metod iteracyjnych. W chwili obecnej do najczęściej używanych metod iteracyjnych dla macierzy symetrycznych dodatnio określonych zaliczamy metodę sprzężonych gradientów (*conjugate gradient method*).

W pracy przedstawiono wyniki obliczeniowe rozwoju pęknięć w stalach uzyskane za pomocą własnej metody elementów konturu brzegowego jak również metody elementów skończonych, przy wykorzystaniu bezpośrednich i iteracyjnych metod rozwiązywania równań liniowych.

Marek JAKUBOWSKI

KOROZJA WŻEROWA STALI W ŚRODOWISKU MORSKIM ORAZ WSPÓŁZALEŻNOŚĆ TEJ KOROZJI I PROCESU ZMĘCZENIA

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Powierzchnie konstrukcji pracujących w środowisku morskim po pewnym okresie eksploatacji ulegają degradacji korozyjnej, nawet jeśli zabezpieczone są powłokami antykorozyjnymi. Mniej lub bardziej równomiernej korozji ogólnej towarzyszy korozja lokalna prowadząca do powstania wżerów korozyjnych. W przeciwieństwie do klasycznych wżerów korozyjnych, obserwowanych na powierzchni stali odpornych na korozję i stopów aluminium, w stalach niestopowych lub niskostopowych głębokości pojedynczych wżerów lub kolonii połączonych wżerów są przeważnie stosunkowo małe w stosunku do ich rozległości. W odniesieniu do niektórych typów statków Towarzystwa Klasyfikacyjne określają dopuszczalną głębokość korozji wżerowej przez odwołanie się do dopuszczalnej minimalnej grubości blachy w rejonie skorodowanym, uwzględniając albo średni ubytek korozyjny w rejonie, albo niekiedy maksymalny lokalny ubytek korozyjny.

Z punktu widzenia wytrzymałości konstrukcji przy obciążeniach statycznych i quasi-statycznych, wżerowy charakter korozji jest przez niektórych specjalistów uważany za czynnik o drugorzędnym znaczeniu. Jednak w warunkach obciążeń zmęczeniowych, wżery korozyjne, o ile występują, są traktowane jako potencjalne i bardzo prawdopodobne miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych.

Praca stanowi fragment pierwszego etapu przyszłych prac zmierzających do opracowania metodyki uwzględniania korozji wżerowej w obliczeniach zmęczeniowych konstrukcji okrętowych. Oparta jest na analizie dostępnej literatury przedmiotu.

W pracy bardzo skrótowo omówiono sam proces korozji wżerowej, szczególny nacisk kładąc na przyczyny lokalizacji wżerów, przedstawiono autokatalityczny mechanizm wzrostu wżerów oraz rolę biologicznej aktywności wody morskiej, wzmiankowano tylko możność modelowania wzrostu wżeru. W paru słowach omówiono też związek korozji wżerowej z mikrostrukturą stali oraz korozję rowkową (*grooving corrosion*) jako pewien aspekt korozji wżerowej.

Więcej miejsca poświęcono kontrowersyjnemu problemowi wpływu obciążeń mechanicznych na inicjację i kinetykę rozwoju korozji wżerowej oraz warunkom przekształcenia wżeru korozyjnego w pęknięcie zmęczeniowe, próbując ustalić kryterium pozwalające ocenić moment tego przekształcenia. Wspomniano o znaczeniu statystycznego rozkładu głębokości wżerów. Omówiono skrótowo wpływ ochrony antykorozyjnej, a zwłaszcza powłok ochronnych na odporność korozyjno-zmęczeniową stali w warunkach korozji wżerowej.

Mieczysław JARONIEK*, Tadeusz NIEZGODZIŃSKI**

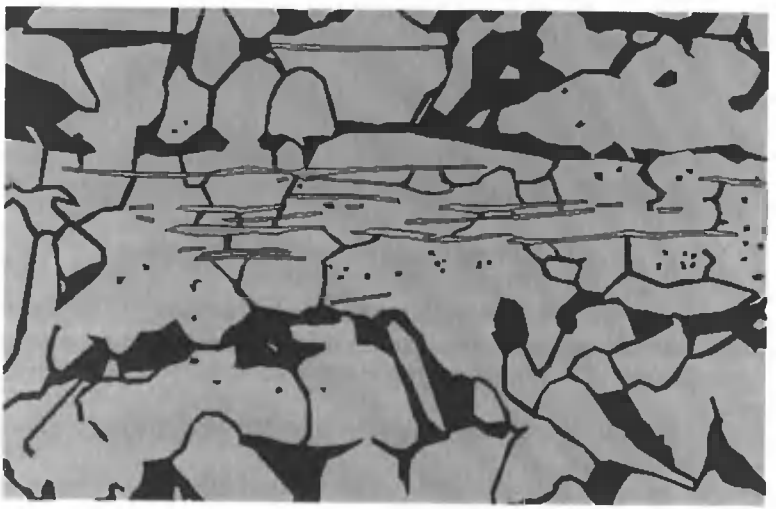
MODELOWANIE PĘKNIĘĆ LAMELARNYCH

* Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny,
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź
** Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny,
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

1. WPROWADZENIE

W pracy przeprowadzono badania modeli symulujących pęknięcia lamelarne. Pęknięcia te powstają w walcowanych blachach z wtrąceniami niemetalicznymi. Badania pęknięć lamelarnych rozpoczęły się w latach 60. ubiegłego wieku i do dziś nie ma zadawalającej teorii ich powstawania.

Na rysunku 1 pokazany jest model numeryczny przykładowego szlifu metalograficznego blachy stalowej perlityczno-ferrytycznej z wtrąceniami niemetalicznymi w postaci siarczków manganu oraz aluminatów.



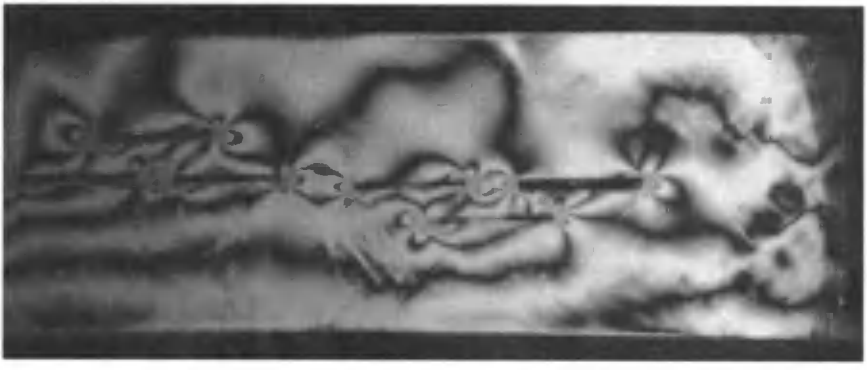
Rys. 1. Model numeryczny próbki z wtrąceniami niemetalicznymi

2. PRZEDMIOT BADAŃ

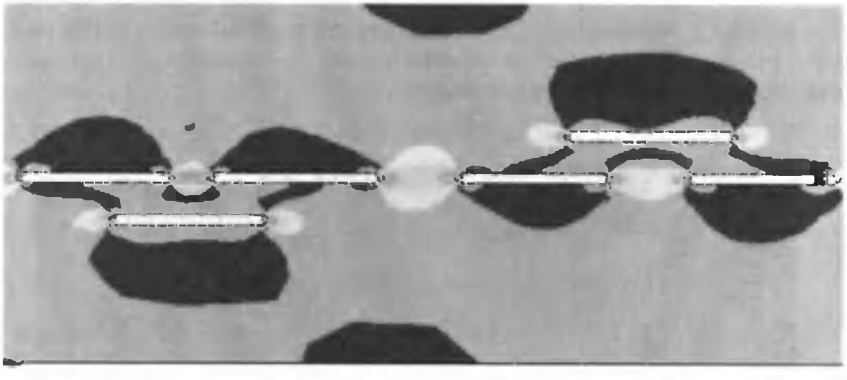
W pracy przedstawiono zastosowanie modelowania próbek z wtrąceniami niemetalicznymi do badania pękania lamelarnego. Badania przeprowadzono przy stosowaniu dwóch metod badawczych: metody elastooptycznej oraz metody elementów skończonych.

Badania elastooptyczne prowadzono, zwiększając obciążenie oraz analizując każdorazowo stan naprężenia (na podstawie rozkładów izochrom – rysunek 2), tak aby

określić wpływ pustek na zmiany pól naprężeń oraz wzajemną ich interakcję w otoczeniu pustek lub szczelin.



Rys. 2. Model elastooptyczny próbki z wtrąceniami



Rys. 3. Model numeryczny próbki z wtrąceniami

Możliwość powstawania pęknięć przeanalizowano numerycznie na modelach płaskich w płaskim stanie naprężenia wygenerowanych z obrazów otrzymanych ze zgładów metalograficznych. Zastosowano rzeczywiste dane materiałowe ferrytu, perlitu oraz wtrąceń.

Metodę elastooptyczną stosowano także do walidacji modelu numerycznego w metodzie elementów skończonych.

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki, projekt nr 7151/B/T02/2011/40.

Mieczysław JARONIEK*, Tadeusz NIEZGODZIŃSKI**

ZASTOSOWANIE ELASTOOPTYKI DO BADANIA PĘKNIĘĆ LAMELARNYCH

* Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny,
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź
** Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny,
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

1. WPROWADZENIE

Metoda elastooptyczna jest jedną ze znanych, konwencjonalnych metod modelowych badań doświadczalnych mechaniki ciała stałego.

Elastooptyka okazała się niezwykle dogodna dla badania rozkładu naprężeń, zwłaszcza dla układów płaskich. Istnieją też techniki badania układów przestrzennych. Metoda ta jest niemal jedyną metodą umożliwiającą wizualizację naprężeń: szczególnie dobrze daje się zauważyć miejsca koncentracji naprężeń.

Metoda ta ma również walory estetyczne, ponieważ otrzymane obrazy są zbiorem kolorowych linii.

Określanie pola naprężeń metodą elastooptyczną jest pracochłonne, ponieważ wymaga dokonania pomiarów w każdym punkcie pola, w którym zamierza się obliczyć wartości naprężeń. Z tego powodu wielu badaczy nie stosuje tej metody; niektórzy naukowcy uważają także, że jest to metoda przestarzała.

Stosowanie tej metody daje jednak inny punkt widzenia na zjawiska występujące w próbce, umożliwia „oglądanie" naprężeń. Jak zwykle, posługując się metodami badawczymi, należy stosować kilka niezależnych metod, porównywać wyniki uzyskane różnymi metodami, a przede wszystkim porównać wyniki z rzeczywistością - czyli z doświadczeniem.

Metodę elastooptyczną można również stosować do walidacji modelu numerycznego w metodzie elementów skończonych.

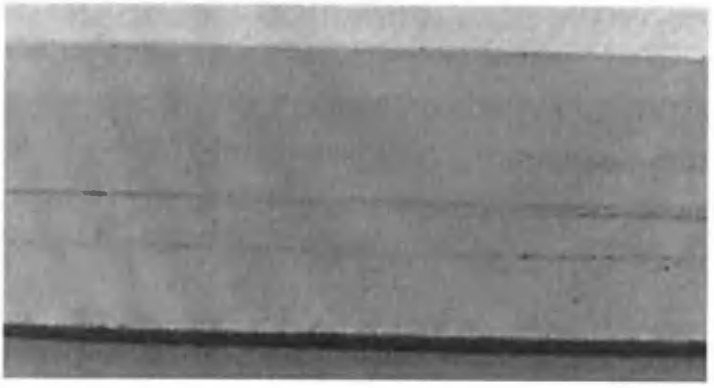
2. PRZEDMIOT BADAŃ

W pracy przedstawiono zastosowanie metody elastooptycznej do badania pękania lamelarnego.

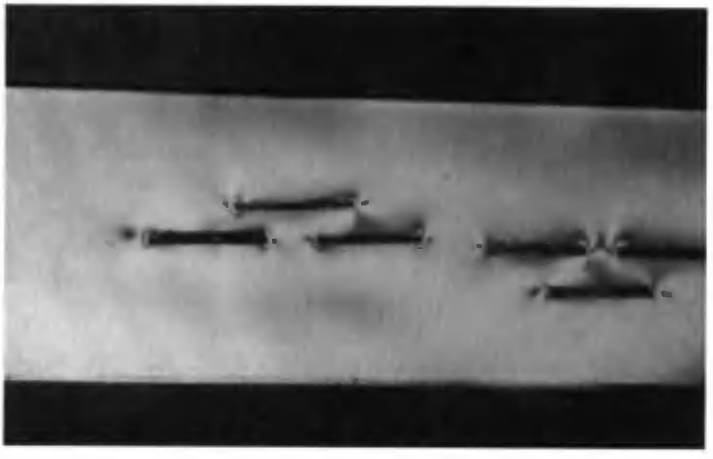
W walcowanych blachach wtrącenia niemetaliczne rozkładają się wzdłuż grubości blachy jako wąskie linie równoległe do kierunku walcowania. Takie wtrącenia są zarodkiem pęknięć lamelarnych.

Na rysunku 1 przedstawiono typową strukturę ferrytyczno-perlityczną z pasmowością spotykaną po walcowaniu jednokierunkowym. Na przekroju próbki widoczne są wtrącenia niemetaliczne typu siarczków manganu.

Badano modele elastooptyczne próbek ze sztucznymi szczelinami długimi ułożonymi w okolicy osi blachy, a także inne spotykane rozkłady wtrąceń.



Rys. 1. Szlif metalograficzny blachy z widocznymi wtrąceniami



Rys. 2. Model elastooptyczny próbki z wieloma wtrąceniami

Badane próbki umieszczono w polaryskopie i poddano równomiernemu rozciąganiu; otrzymano obrazy izochrom. Obserwowano zmiany stanu naprężenia w otoczeniu wtrąceń wraz ze wzrostem obciążenia. Spiętrzenie naprężeń prowadzi do powstawania pęknięć lamelarnych – łączenia się pustek zarówno w kierunku równoległym do powierzchni zewnętrznej blachy (powstają wtedy tzw. „tarasy") oraz pod kątem (powstają wtedy tzw. „uskoki").

Wyniki badań elastooptycznych porównano z obliczeniami numerycznymi.

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki
projekt nr 7151/B/T02/2011/40.

Grzegorz JUNAK

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA STALI 13HMF PRZY OBCIĄŻENIACH STOPNIOWANYCH O CHARAKTERZE MAŁOCYKLOWYM

Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii,
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

1. WSTĘP

Praca dotyczy badań zmęczenia w zakresie małej liczby cykli materiału rurociągów energetycznych w stanie wyjściowym i po wieloletniej eksploatacji. Przeprowadzono monotoniczne badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli oraz badania przy obciążeniach stopniowanych. W pracy dokonano oceny trwałości zmęczeniowej (Nz) stali 13HMF w temperaturze pokojowej. Opracowano charakterystyki zmęczeniowe opisujące zachowanie się materiału ze stanu wyjściowego oraz materiału eksploatowanego. Dokonano oceny wpływu obciążeń stopniowanych na trwałość zmęczeniową stali. W tym celu przeprowadzono sekwencyjne badania zmęczeniowe przy dwóch zakresach odkształcenia całkowitego 0,6 i 1,2% wg przyjętych procedur badań:

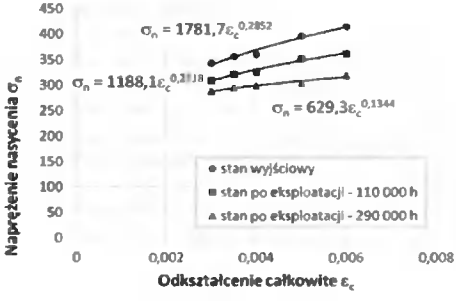
- pierwsza określona liczba cykli realizowana przy $\Delta\varepsilon_c = 0{,}6\%$ następnie do zniszczenia przy $\Delta\varepsilon_c = 1{,}2\%$ (procedura A),
- pierwsza określona liczba cykli realizowana przy $\Delta\varepsilon_c = 1{,}2\%$ następnie do zniszczenia przy $\Delta\varepsilon_c = 0{,}6\%$ (procedura B).

Uzyskane wyniki porównano z Hipotezą Palmgrena-Minera w celu wykazania wpływu historii odkształcenia na niskocyklową trwałość zmęczeniową. Wyznaczono również trwałość zmęczeniową na podstawie kryterium zaproponowanego we wcześniejszych opracowaniach [3].

2. BADANIA ZMĘCZENIA W ZAKRESIE MAŁEJ LICZBY CYKLI

Stan po eksploatacji wykazuje znacznie wyższą niskocyklową trwałość zmęczeniową rozumianą jako liczba cykli do zniszczenia w porównaniu z materiałem w stanie wyjściowym (rys. 1).

Rys. 1. Zestawienie trwałości zmęczeniowej stali 13HMF



Rys. 2. Zestawienie naprężenia nasycenia stali 13HM

$$P = c \cdot \Delta\varepsilon_c^{\,d} + a \cdot e^{N_f \cdot b} \quad (1)$$

$$W_k = \int_0^{N_{if}} P(\Delta\varepsilon_c, N) \cdot dN = const. \quad (2)$$

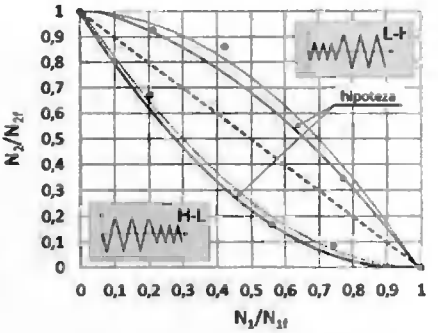
$$W_i = \int_{N_{ip}}^{N_{ik}} P(\Delta\varepsilon_{ci}, N) \cdot dN \quad (3)$$

gdzie:

P – funkcja gęstości energii

N_{if} – liczba cykli do zniszczenia przy danym zakresie odkształcenia $\Delta\varepsilon_i$

a, b, c, d – stałe wyznaczane na podstawie jednoetapowych prób zmęczenia niskocyklowego



Rys. 3. Porównanie trwałości zmęczeniowej z wynikami uzyskanymi na podstawie kryterium trwałości zmęczeniowej dla badań stopniowanych – stan wyjściowy

Materiał po wieloletniej eksploatacji wykazuje jednak znacznie niższy poziom naprężenia nasycenia dla poszczególnych zakresów badań zmęczeniowych w porównaniu z materiałem w stanie wyjściowym (rys. 2). Zarówno dla materiału w stanie wyjściowym jak i dla materiału w stanie po eksploatacji punkty pomiarowe uzyskane dla badań realizowanych wg procedury **A** układały się powyżej hipotezy Palmgrena-Minera, natomiast dla badań realizowanych wg procedury **B** układały się poniżej hipotezy Palmgrena-Minera (rys. 3).

3. WNIOSKI

- Stal 13HMF wykazuje znacznie wyższą trwałość rozumianą jako liczba cykli do zniszczenia w stanie po eksploatacji jednak wyraźnie obniża się zdolność do przenoszenia naprężeń o charakterze małocyklowym.
- Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa badanych stali zależy w głównej mierze od ich własności plastycznych.
- Zaproponowane w pracy kryterium trwałości zmęczeniowej przy obciążeniach stopniowanych może być pomocne w ocenie trwałości materiałów poddanych procesowi zmęczenia o charakterze małocyklowym.

LITERATURA

[1] Kocańda S., Kocańda A., 1989. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali. PWN.
[2] Kocańda S., 1983. Podstawy konstrukcji maszyn. Podstawy obliczeń zmęczeniowych w zakresie wytrzymałości niskocyklowej i w warunkach rozwoju pęknięć. WAT Warszawa.
[3] Okrajni J., Junak G., 2008. Low cycle fatigue of steels at high temperature under gradual loading, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 26(2), 147-150.

Jerzy KALETA, Michał KRÓLEWICZ, Daniel LEWANDOWSKI, Michał PRZYBYLSKI

BADANIA ZMĘCZENIOWE ELASTOMERÓW MAGNETOREOLOGICZNYCH

Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej,
ul. Smoluchowskiego 25, 50- 370 Wrocław

1. WSTĘP I CEL PRACY

Elastomery magnetoreologiczne należą do grup materiałów Smart stymulowanych polem magnetycznym (ang.: *Smart Magnetic Materials*), a dokładniej do podgrupy, którą tworzą także ciecze, żele i gąbki magnetoreologiczne. Cechą charakterystyczna tej klasy materiałów jest zmiana właściwości mechanicznych i reologicznych pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego [1], dzięki czemu, w efektywny sposób, można sterować ich właściwościami. Ta własność elastomerów magnetoreologicznych pozwala na szereg nowych zastosowań, przede wszystkim w zakresie tłumienia drgań. Wykorzystanie bowiem materiałów o sterowalnych właściwościach tłumiących pozwala na zupełnie nowe koncepcje konstrukcyjne oraz na znacznie efektywniejszą redukcję drgań. Skuteczne aplikacje tej klasy elastomerów wymagają zbadania wpływu liczby cykli obciążenia mechanicznego i magnetycznego na właściwości magnetomechaniczne, co było celem badań.

2. WYNIKI BADAŃ

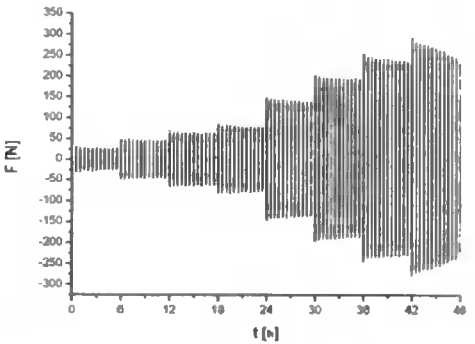
W pierwszym etapie przeprowadzono badanie, w którym wielkość amplitudy odkształcenia zwiększano skokowo, co określoną liczbę cykli [2]. Test miał zatem charakter swoistej próby narastającej. Celem było wyznaczenie progu obciążenia, poniżej którego występuje nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa. Miało to posłużyć jak „punkt wyjścia" do badań w warunkach ustalonego poziomu odkształcenia (amplitudy odkształcenia). Rezultat pokazano na rysunku 1.

Próbkę obciążano cyklicznie z częstotliwością 5 Hz. Jednocześnie zadawano pole magnetyczne o natężeniu równym 115 $kA \cdot m^{-1}$. Stymulację magnetyczną prowadzono przez 2 minuty co 0,5 h, co odpowiadało realizacji 9000 cykli. Obciążenie mechaniczne miało postać widma sinusoidalnego o amplitudzie przemieszczenia równej odpowiednio: 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,5 mm. Zmianę amplitudy przeprowadzono każdorazowo po upływie 108000 cykli. Dla najniższego progu poziomów przemieszczenia, widoczny jest początkowy spadek wartości siły i następna jej stabilizacja (nasycenie). Przy wyższych poziomach odkształcenia następuje natomiast ciągły spadek wartości siły, co może świadczyć o postępującej destrukcji wewnętrznej struktury materiału i wynikającym stąd niestabilnym zachowaniu.

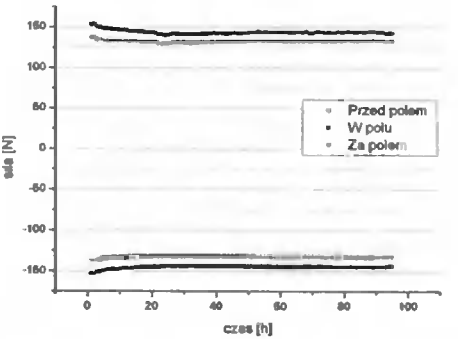
Na podstawie obserwacji wyznaczony został najwyższy próg amplitudy przemieszczenia równy 0,2 mm, dla którego nie zaobserwowano spadków amplitudy siły w czasie całego procesu odkształcania.

W drugim etapie, dla wyznaczonej wartości amplitudy przemieszczenia, przeprowadzono długotrwałe badania cykliczne właściwości magnetoreologicznych. Główną

cechą tych elastomerów jest zmiana właściwości mechanicznych, w funkcji pola magnetycznego. Działanie to jest kluczowe, dlatego postanowiono sprawdzić, jaki wpływ ma na nie długotrwały proces cyklicznego odkształcania. Rezultaty przedstawiono na rysunku 2. Badania wykonano przy częstotliwości 5 Hz, w czasie 96 h, co odpowiada upływowi 1728000 cykli. Stymulacja polem magnetycznym była uruchamiania co 1h, a jego natężenie wzrastało od 0 do 115 $kA \cdot m^{-1}$ przez 120 sek. Można zauważyć, iż po początkowym zmniejszeniu amplitudy siły – następuje jej trwała stabilizacja.



Rys. 1. Przebieg zmian siły w czasie, dla kolejnych narastających progów odkształcenia, dla badanego typu elastomeru magneto-reologicznego



Rys. 2. Przebieg zmian amplitudy siły dla cyklicznego odkształcania elastomeru magnetoreologicznego z okresowym włączaniem i wyłączaniem zewnętrznego pola magnetycznego

3. WNIOSKI

Badania wykazały, że – dla założonego poziomu obciążenia – właściwości magnetomechaniczne są stabilne, mimo zadawania cyklicznego obciążenia mechanicznego i magnetycznego w długim okresie czasu. Rokuje to pomyślnie w kwestii aplikacji elastomeru w urządzeniach tłumiących.

LITERATURA

[1] Kallio M., 2005. The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers. Ph.D. Thesis, Tampere University of Technology, Finland.

[2] Kaleta J., Królewicz M., Lewandowski D., 2011. Magnetomechanical properties of anisotropic and isotropic magnetorheological composites with thermoplastic elastomer matrices. Smart Materials & Structures 20(8).

Jerzy KALETA, Daniel LEWANDOWSKI, Rafał MECH

NIEJEDNORODNOŚĆ EFEKTU VILLARIEGO W CYKLICZNIE OBCIĄŻONYM KOMPOZYCIE O GIGANTYCZNEJ MAGNETOSTRYKCJI

Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej,
ul. Smoluchowskiego 25, 50- 370 Wrocław

1. WSTĘP I CEL PRACY

Terfenol-D – jako typowy reprezentant materiałów o tzw. gigantycznej magnetostrykcji – umożliwia przekształcanie energii magnetycznej w mechaniczną (magnetostrykcja) jak i mechanicznej w magnetyczną (efekt Villariego). Może być zatem stosowany w budowie aktuatorów, czujników (np. czujniki tensometryczne, akcelerometry, czujniki zbliżeniowe, czujniki momentu obrotowego, magnetometry itp.) [1] jak i tzw. harvesterów. Mankamentem jest występowanie silnych prądów wirowych w następstwie obciążeń cyklicznych oraz niska wytrzymałość na rozciąganie. Chcąc zaradzić tym problemom próbuje się wytwarzać kompozyty polimerowe zawierające sproszkowany Terfenol-D. Wymaga to zbadania, na ile jednorodny jest efekt Villariego w objętości kompozytu. Zagadnienie to było celem niniejszej pracy.

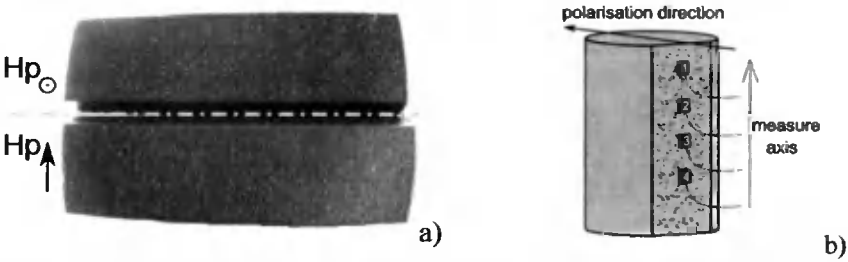
3. MATERIAŁ. PROCEDURA BADAŃ

Próbki kompozytowe zawierały 45% (objętościowo) proszku Terfenolu-D. W trakcie wytwarzania w walcowej próbce wywołano anizotropię przez zastosowanie polaryzacji magnetycznej, odpowiednio wzdłuż lub w poprzek osi próbek [2]. Dodatkowa preparatyka próbek polegała na przygotowaniu odpowiednich powierzchni w celu pomiaru wielkości magnetycznych (konieczność zachowania stałej odległości czujnika od próbki). Powierzchnie wykonano poprzez odpowiednie przecięcie próbek, gdzie linia cięcia była prostopadła i równoległa do kierunku magnesowania. Na rysunku 1a przedstawiono powierzchnie przygotowane do badania efektu Villariego.

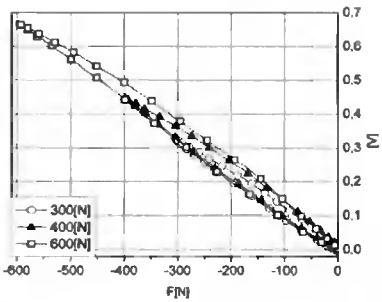
Procedura badań obejmowała wywołanie cyklicznie zmiennego naprężenia ściskającego w próbce kompozytowej i rejestrację zmian napięcia w czujniku pola magnetycznego (magnetorezystor). Pozwalało to na wyznaczenie wartości natężenia pola magnetycznego na powierzchni próbki. Kierunek działania siły obciążającej pokrywał się z osią próbki. Widmo obciążenia było sinusoidalne o częstotliwości 1 Hz.

Procedura badań polegała na wyznaczeniu zmian natężenia pola magnetycznego na powierzchni próbki kompozytowej w zależności od miejsca położenia czujnika oraz wartości siły obciążającej kompozyt. Położenie magnetorezystora zmieniano wzdłuż głównej osi próbki. Ułożenie czujnika i punkty pomiarowe zaprezentowano na rysunku 1b.

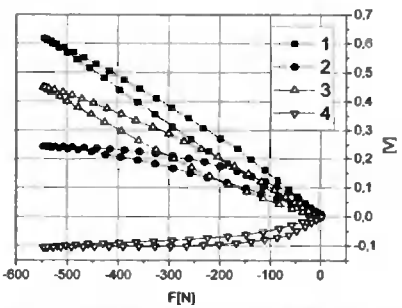
Na rysunku 2 zilustrowano przyrost pętli pod wpływem zmiany amplitudy siły, w zadanym (wybranym) punkcie próbki. Natomiast rysunek 3 prezentuje zmiany pętli mechaniczno-magnetycznej dla czterech różnych punktów pomiarowych. Znaczące zróżnicowanie efektu Villariego może być związane z magnetyzacją próbki kompozytu, która kształtowana była w trakcie wytwarzania.



Rys. 1. Widok próbki kompozytu z powierzchnią wykonaną prostopadle i równoległe do kierunku polaryzowania (a), rozkład czujników pomiarowych na powierzchni próbki (b)



Rys. 2. Pętle histerezy w układzie siła wymuszająca-napięcie (z magnetorezystora), dla różnych wartości amplitudy naprężenia w wybranym punkcie pomiarowym



Rys. 3. Pętle histerezy mechaniczno-magnetycznej dla różnych punktów pomiarowych, przy stałej amplitudzie siły wymuszającej

3. WNIOSKI

Wykazano, iż rozkład odpowiedzi magnetycznej na cykliczne wymuszenie mechaniczne próbek kompozytowych o tzw. gigantycznej magnetostrykcji nie jest jednorodny. Wymaga to uwzględnienia w przypadku wytwarzania czujników lub zmian w technologii wytwarzania kompozytu i jego magnetyzacji.

LITERATURA

[1] Kaleta J., Lewandowski D., Mech R., Gąsior P., 2009. Magnetomechanical properties of Terfenol-D powder composites. Solid State Phenomena 154, 35-40.

[2] Kaleta J., Lewandowski D., Mech R., 2011. Magnetomechanical properties of monolithic Terfenol-D versus epoxy bonded composite with Terfenol-D powder. Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seoul Korea, 2183--2192.

**Aleksander KAROLCZUK, Krzysztof KLUGER,
Mateusz KOWALSKI, Grzegorz ROBAK**

ROZWÓJ PĘKNIĘĆ W BIMETALU STAL-TYTAN W PRÓBIE CYKLICZNEGO ROZCIĄGANIA-ŚCISKANIA

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-270 Opole

1. WSTĘP

Obecnie można zauważyć duże zapotrzebowanie na nowe materiały konstrukcyjne, dzięki którym projektowane elementy maszyn będą bardziej wytrzymałe i niezawodne. Bardzo popularną grupą materiałów są materiały kompozytowe, które umożliwiają łączenie właściwości różnych materiałów. Istnieje dużo typów materiałów kompozytowych jak również sposobów ich wytwarzania.

Jednym ze sposobów pozwalającym uzyskać kompozyt powstały z połączenia stali z tytanem jest spajanie wybuchowe. Dzięki tej metodzie powstaje trwałe połączenie pomiędzy dwoma lub więcej metalami. Tego typu bimetale znajdują zastosowanie w aparaturze procesowej i energetycznej, np: wymienniki ciepła, reaktory, kolumny, rurociągi i inne.

Niezbędne jest przeprowadzenie badań mających na celu określenie zachowania się tych materiałów w określonych stanach obciążenia. Ważnym jest również poznanie mechanizmów towarzyszących rozwojowi pęknięć, szczególnie w obrębie miejsca łączenia materiałów.

Celem niniejszej pracy jest analiza rozwoju pęknięć zmęczeniowych w bimetalu utworzonego z dwóch warstw stalowej (S355J2) i tytanowej (Grade 1).

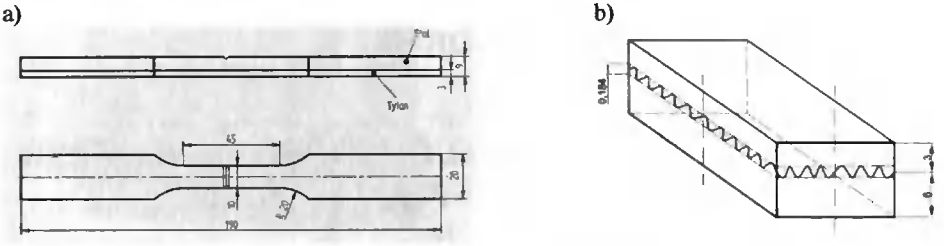
2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne przeprowadzone zostały na maszynie zmęczeniowej hydraulicznej typu SHM 250. Rozwój pęknięć obserwowano i rejestrowano za pomocą mikroskopu stereoskopowgo z kamerą. Do badań użyto próbki wykonanej z bimetalu stal-tytan przedstawionej na rysunku 1a. Właściwości składowych bimetalu zamieszczono w tabeli 1. Na rysunku 1b przedstawiono schemat połączenia stali z tytanem.

Tabela 1. Właściwości bimetalu

Materiał	Moduł E, GPa	Współczynnik Poisona
Stal S355J2	220	0,30
Tytan Grade 1	103	0,37

a) b)

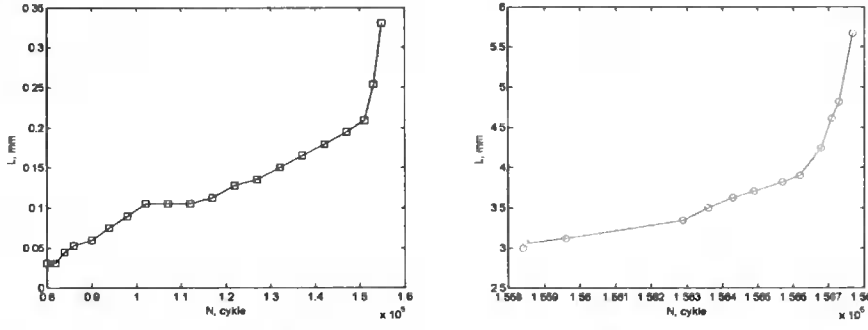


Rys. 1. Kształt i wymiary próbki z naciętym karbem (karb nacięty na głębokość 0,5 mm)(a), schemat połączenia stali z tytanem (wysokość warstwy tytanowej: 3 mm, wysokość warstwy stalowej: 6 mm) (b)

3. ANALIZA WYNIKÓW DOŚWIADCZALNYCH

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy zmiany długości pęknięcia zmęczeniowego L w funkcji liczby cykli N, przy rozciąganiu ze ściskaniem przy obciążeniu $F(t) = F_a \sin(2\pi ft)$ (gdzie: $F_a = 12$ kN). Rozwój pęknięć po obu stronach próbki był nierównomierny. Z jednej strony próbki (umownie nazwanej prawą stroną) pęknięcie rozwijało się wyraźnie szybciej niż po drugiej stronie próbki. Natomiast w okolicy połączenia dwóch materiałów można było zaobserwować wyraźny wzrost prędkości przyrostu pęknięcia wraz ze wzrostem liczby cykli oraz pęknięcie zaczęło się rozgałęziać powodując rozwarstwienie połączenia i całkowite zerwanie próbki.

a) b)



Rys. 2. Zmiany długości pęknięcia zmęczeniowego w funkcji liczby cykli N, przy rozciąganiu ze ściskaniem przy obciążeniu $F_a = 12$ kN: a) lewa strona próbki, b) prawa strona próbki.

LITERATURA

[1] Dyja H., Maranda A., Trebliński R., 2001. Technologie wybuchowe w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej.

[2] Król S., Bański R., Szulc Z., Gałka A., 2007. Practical aspects of structural tests of titanium-steel bonds made by explosive cladding and exposed to thermal process loads. Advances in Material Science 7, 50-56.

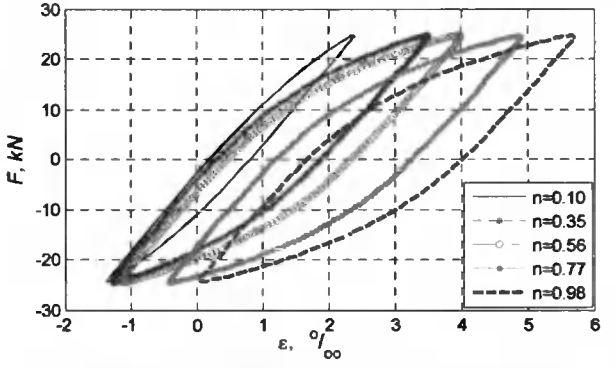
**Aleksander KAROLCZUK, Krzysztof KLUGER,
Mateusz KOWALSKI, Fabian ŻOK, Grzegorz ROBAK**

NAPRĘŻENIA WŁASNE W ANALIZIE ZMĘCZENIA MECHANICZNEGO BIMETALU STAL-TYTAN OTRZYMANEGO W WYNIKU ZGRZEWANIA WYBUCHOWEGO

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, a.karolczuk@.po.opole.pl

WPROWADZENIE

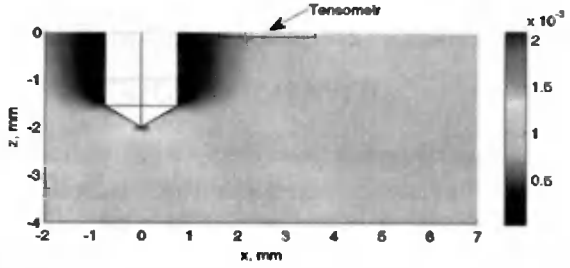
Zgrzewanie wybuchowe jest specyficzną technologią łączenia metali, dzięki której można łączyć metale o różnych właściwościach strukturalnych i mechanicznych, tzw. niespawalnych metodami konwencjonalnymi [1]. Cechą charakterystyczną elementów zgrzewanych wybuchowo jest strefa połączenia materiałów, która wykazuje: unikatowy kształt (powierzchnia falista lub płaska), niejednorodność własności fizycznych, niejednorodność strukturalną [2], naprężenia własne [3]. Dotychczasowe badania eksperymentalne przy obciążeniach zmiennych ograniczają się do wahadłowego zginania [4, 5], co nie pozwala na jednoznaczną identyfikację podstawowych zjawisk zmęczeniowych. Na podstawie badań wstępnych [6] ustalono, że bimetal stal-tytan (S355J2-Tytan Grade 1) w próbie zmęczeniowej rozciąganie-ściskanie o zerowej wartości średniej siły wykazuje wzrastającą wartość: średnią odkształceń (*ratcheting*) oraz amplitud (niestabilność, rysunek 1). W celu wyjaśnienia tych zjawisk należy jednoznacznie określić stan naprężenia zarówno w części stalowej, jak i tytanowej, co wymaga ustalenia między innymi wartości naprężeń własnych. Wyznaczenie wartości naprężeń własnych metodą trepanacji jest głównym celem niniejszej pracy.



Rys. 1. Wyniki badań wstępnych bimetalu stal-tytan (S355J2-Ti Grade 1) przy rozciąganiu-ściskaniu o zerowej wartości średniej siły. Zarejestrowane pętle histerezy świadczące o zjawisku ratchetingu oraz cyklicznej niestabilności (gdzie: $n = N/N_f$, N – bieżąca liczba cykli, N_f – liczba cykli do zniszczenia)

METODOLOGIA BADAŃ

Naprężenia własne ustalono na podstawie pomiaru zmiany stanu odkształcenia rozetą tensometryczną. Pomiaru dokonano zarówno w części tytanowej, jak i stalowej w elemencie bez obróbki cieplnej oraz po obróbce cieplnej. W celu osiągnięcia jak najwyższej dokładności pomiaru zmianę stanu odkształcenia zasymulowano metodą elementów skończonych [7] w modelu bryłowym. Uwzględniono w ten sposób kształt wiertła, rozmieszczenie i wielkość tensometrów oraz głębokość nawierconego otworu (rys. 2).



Rys. 2. Przykładowy rozkład odkształceń w przekroju elementu dla otworu o średnicy 1,5 mm i głębokości 2 mm przy symulowanym naprężeniu własnym 100 MPa

LITERATURA

[1] Dyja H., Maranda A., Trebliński R., 2001. Technologie wybuchowe w inżynierii materiałowej. Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej.

[2] Król S., Bański R., Szulc Z., Gałka A., 2007. Practical aspects of structural tests of titanium-steel bonds made by explosive cladding and exposed to thermal process loads. Advances in Material Science 7, 50-56.

[3] Pervukhin L.B., Mal'tsev YU., Konon A., Tsemakhovich B.D., Chydnovski A.D., Distribution of internal stresses in bimetal steel 22K+steel Kh18N10T obtained by explosive welding, Metal Science and Heat Treatment 17(11), 934-937.

[4] Čižek L. Ostroushko D., Szulc Z., Molak R., Prażmowski M., 2010. Properties of sandwich metals joined by explosive cladding method. Archives of Materials Science and Engineering 43(1), 21-29.

[5] Ostroushko D., Mazancová E., 2010. Chosen properties of sandwich CrNi steel-Ti material after explosive cladding, Conference proceedings of 19th International Conference on Metallurgy and Metals, Czech Republic.

[6] Karolczuk A., Kowalski M., Bański R., Żok Ż., 2011. Badania zmęczeniowe bimetali typu stal-tytan zgrzewanych metodą wybuchową w próbie cyklicznego rozciągania-ściskania. XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Tytan i jego stopy – 2011, Politechnika Rzeszowska, s. 4.

[7] COMSOL, Structural Mechanics Module User's Guide, version 3.3, (www.comsol.com), 2006.

Andrzej KAZBERUK, Mykhaylo P. SAVRUK, Grzegorz TARASIUK

KONCENTRACJA NAPRĘŻEŃ W ZAOKRĄGLONYCH WIERZCHOŁKACH KARBÓW I OTWORÓW W STANIE ANTYPŁASKIM

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,
ul. Wiejska 45, 15-351 Białystok

1. JEDNOLITE PODEJŚCIE DO PROBLEMÓW KONCENTRACJI NAPRĘŻEŃ W KARBACH OSTRYCH I ZAOKRĄGLONYCH

Istota metody jednolitego podejścia polega na obliczaniu naprężeń w wierzchołku karbu zaokrąglonego (rys. 1a). Przy małym promieniu krzywizny dokonuje się przejścia granicznego do karbu ostrego (rys. 1b). Jest ono możliwe dzięki znajomości związków pomiędzy współczynnikami koncentracji naprężeń w wierzchołku karbu zaokrąglonego a współczynnikami intensywności naprężeń w wierzchołku karbu ostrego. Dla stanu symetrycznego (I stan odkształceń w otoczeniu wierzchołka karbu) zależności takie zostały opracowane i opublikowane w pracy [1], a efektywność zaproponowanej metody została wielokrotnie wykazana w publikacjach [2, 3]. Udowodniono również, że na wartości maksymalnych naprężeń w wierzchołku karbu zaokrąglonego wpływają nie tylko promień krzywizny wierzchołka i kąt rozwarcia karbu, ale także kształt karbu w pewnym otoczeniu wierzchołka.

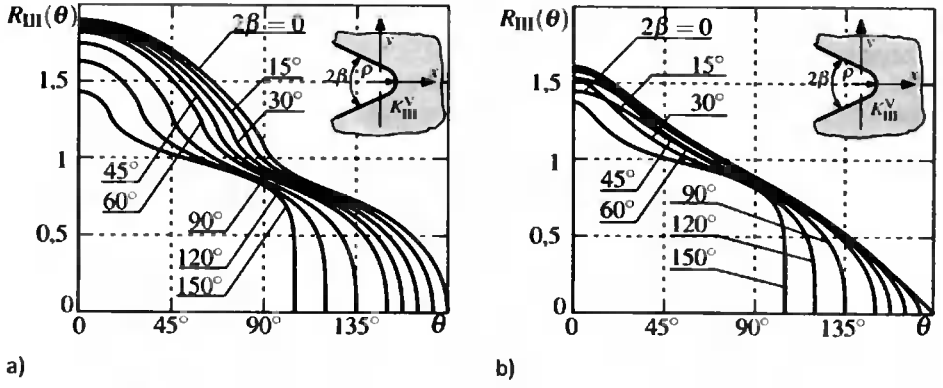
Podobne zależności, wiążące współczynniki koncentracji i intensywności naprężeń, opracowano [4] dla karbów poddanych obciążeniom antysymetrycznym (II stan odkształceń w otoczeniu wierzchołka karbu). Wyznaczono związek pomiędzy maksymalnym naprężeniem normalnym na krawędzi karbu a współczynnikiem intensywności naprężeń K_{II}^{V} odpowiedniego karbu ostrego. Ustalono także położenie punktu ekstremalnych naprężeń w funkcji kąta rozwarcia karbu oraz zależność gradientu naprężeń normalnych w wierzchołku karbu od współczynnika intensywności naprężeń.

Ostatnio [5] rozwiązano zagadnienie antypłaskich teorii sprężystości dla nieskończonego, zaokrąglonego karbu obciążonego w nieskończoności asymptotyką pola naprężeń odpowiadającą III typowi pola odkształceń w otoczeniu wierzchołka karbu. Otrzymano rozkład naprężeń wzdłuż krawędzi karbu w postaci zależności:

$$\tau_{rt}(\theta) = R_{III}(\beta,\theta) K_{III}^{V} (2\pi\rho)^{-\lambda_{III}} \tag{1}$$

gdzie: K_{III}^{V} to współczynnik intensywności naprężeń dla karbu ostrego V o kącie rozwarcia 2β, a λ_{III} to wykładnik osobliwości naprężeń.

Obliczenia przeprowadzono również dla karbu hiperbolicznego. Porównanie rozkładu bezwymiarowych naprężeń $R_{III}(\beta,\theta)$ dla obu geometrii przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Rozkład bezwymiarowego naprężenia $R_{III}(\beta,\theta)$ wzdłuż krawędzi zaokrąglonego karbu V (a), karbu hiperbolicznego (b) dla różnych kątów rozwarcia karbu 2β

2. APLIKACJA METODY JEDNOLITEGO PODEJŚCIA DO ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIEŃ KONCENTRACJI NAPRĘŻEŃ W WIERZCHOŁKACH OTWORÓW

W pracy przedstawiono zastosowanie metody jednolitego podejścia do problemów koncentracji naprężenień w karbach ostrych i zaokrąglonych w płaszczyźnie poddanej antypłaskiemu ścinaniu. Wykorzystując metodę osobliwych równań całkowych [6], obliczono współczynniki koncentracji naprężeń w wierzchołkach otworów: eliptycznego, szczeliny fizycznej, owalu i otworu rombowego dla szerokiego zakresu zmienności parametrów geometrycznych. Przy małych promieniach zaokrąglenia wierzchołków otworów, korzystając z asymptotycznej zależności pomiędzy współczynnikami koncentracji i intensywności naprężeń, dokonano przejścia granicznego obliczając współczynniki intensywności naprężeń w ostrych wierzchołkach otworów.

LITERATURA

[1] Savruk M.P., Kazberuk A., 2006. Relationship between the stress intensity and stress concentration factors for sharp and rounded notches. Materials Science 42(6), 725-738.
[2] Savruk M.P., Kazberuk A., 2010. Two-dimensional fracture mechanics problems for solids with sharp and rounded V-notches. Int. J. Fract. 161(1), 79-95.
[3] Kazberuk A., 2010. Dwuwymiarowe zagadnienia mechaniki pękania ciał z karbami. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.
[4] Savruk M.P., Kazberuk A., 2012. Distribution of stresses near V-shaped notches in the complex stressed state. Materials Science 47(4), 476-487.
[5] Savruk M.P., Kazberuk A., Tarasiuk G., 2012. Stress distribution on the contour of rounded V-shaped notch under antiplane strain. Materials Science 47(6), 733-745.
[6] Savruk M.P., 1981. Dwuwymiarowe zagadnienia sprężystości ciał ze szczelinami (w języku rosyjskim) Naukowa Dumka, Kijów.

Sylwester KŁYSZ*,, Janusz LISIECKI*, Gabriel GMURCZYK*, Piotr REYMER*, Andrzej LESKI*, Dariusz BOCHENEK*, Dariusz ZASADA*****

ANALIZA METOD UZYSKIWANIA ZNACZNIKÓW NA POWIERZCHNI ZŁOMU ZMĘCZENIOWEGO W STRUKTURZE PŁATOWCA

* Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa
** Uniwersytet Warmińsko-mazurski, Olsztyn
*** Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

1. WSTĘP

Artykuł ten prezentuje wyniki badań nad metodami uzyskiwania znaczników na powierzchni złomu zmęczeniowego. Prace zostały przeprowadzone w ramach programu System Eksploatacji Według Stanu Technicznego (SEWST) finansowanego przez Ministerstwo Obrony Narodowej realizowanego przez EADS-PZL "Okęcie" we współpracy z Instytutem Technicznym Wojsk Lotniczych oraz VZLU (Výzkumný a Zkušební Letecký Ustav, Czechy, Praga). Głównym zadaniem programu jest modernizacja systemu eksploatacji wojskowego samolotu szkolno-treningowego PZL-130 "Orlik" TC-II.

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule było określenie najbardziej efektywnej metody uzyskiwania znaczników, pozwalających na określenie prędkości propagacji uszkodzeń zmęczeniowych powstałych w strukturze płatowca w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej.

2. OPIS ZAGADNIENIA

Przeprowadzone badania dotyczyły modyfikacji bloku obciążeń, przygotowanego na potrzeby pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu PZL-130 "Orlik" TC-II, mającej na celu uzyskanie łatwych do zidentyfikowania prążków na powierzchni złomów. Dokonano analizy znanych metod wprowadzania markerów, sekwencji obciążeń wewnątrz bloku o parametrach znacząco różnych od sąsiednich obciążeń w bloku, dla widm o zmiennej amplitudzie a w szczególności dla widm lotniczych dla pełnoskalowych prób zmęczeniowych [3, 4], wywołujących znaczniki na powierzchni złomu zmęczeniowego. Spośród rozpoznanych metod mających wpływ na powstawanie znaczników przetestowano:

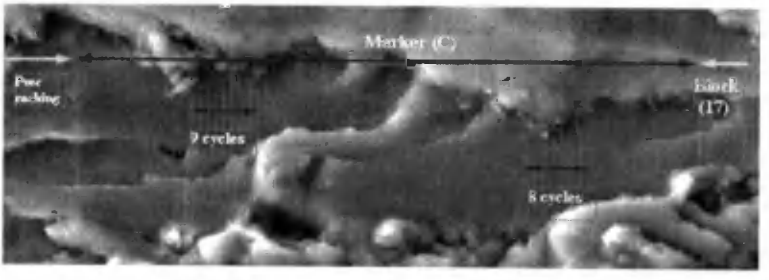
- wykorzystanie wejściowej sekwencji zmiennych obciążeń,
- wprowadzanie sekwencji o zwiększonym poziomie obciążeń,
- wprowadzenie sekwencji o zmniejszonym poziomie obciążeń,
- modyfikacja kolejności cykli (*reordering*).

Badania eksperymentalne przeprowadzono na próbkach *Wedge Opening Load* (WOL) wykonanych z materiału o właściwościach identycznych z materiałem, z którego wykonana jest struktura płatowca samolotu PZL-130 "Orlik" TC-II. Badania zmęczeniowe z zastosowaniem specjalnie przygotowanych bloków obciążeń wykonywane były w akredytowanym Laboratorium Badań Wytrzymałościowych Materiałów ITWL.

Badania fraktograficzne struktury powierzchni złomów przeprowadzono w Wojskowej Akademii Technicznej z zastosowaniem mikroskopu skaningowego Quanta 3D FEG DualBeam.

3. PODSUMOWANIE

Wynikiem badań były zdjęcia skanningowe powierzchni złomów z widocznymi znacznikami zmęczeniowymi, które poddane zostały analizie w celu wyróżnienia znaczników odpowiadających markerom wprowadzonym do zmodyfikowanych sekwencji obciążeń.



Rys. 1. Odwzorowanie przykładowego markera w strukturze złomu (pow. 1400x)

W wyniku przeprowadzonych badań zaproponowano uwzględnienie naturalnych znaczników powstałych poprzez zamianę kolejności cykli obciążeń (*reordering*) podczas realizacji pełnoskalowej próby zmęczeniowej. Docelowo analiza powierzchni złomów uszkodzeń zmęczeniowych powstałych w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu PZL-130 "Orlik" TC-II pozwoli na określenie prędkości propagacji pęknięć, jak również ustalenie czasu ich inicjacji.

LITERATURA

[1] Podskarbi S., 2010. Dokumentacja techniczna z zabudowy czujników tensometrycznych na płatowcu PZL-130 „Orlik" TC-II nr boczny 037. Sprawozdanie Nr 89/31/2010. ITWL Warszawa.

[2] Leski A., 2010. Wyznaczenie sekwencji obciążeń do próby zmęczeniowej samolotu PZL-130 „Orlik" TC-II Etap I – wyznaczenie reprezentatywnej sekwencji złożonej z zarejestrowanych lotów badawczych. Sprawozdanie Nr 152/31/2010. ITWL Warszawa.

[3] Barter S.A., Molent L., Wanhill R.J.H, 2009. Marker loads for quantitative fractography of fatigue cracks in aerospace alloys. Proceedings of the 25th ICAF Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue. Rotterdam.

[4] Wanhill R.J.H., Barter S.A., 1994. NLR Technical Publication TP 94177 U. National Aerospace Laboratory NLR Amsterdam.

[5] Fawaz A.S., 2000. Equivalent initial flaw size testing and analysis. Report Nr AFRL-VA-TR--2000-3024, Air Force Research Laboratory Ohio.

Dorota KOCAŃDA, Volodymyr HUTSAYLYUK, Tomasz ŚLĘZAK, Janusz TORZEWSKI

PRĘDKOŚĆ ZMĘCZENIOWEGO PĘKANIA STALI S235 I S355 PO POWIERZCHNIOWEJ OBRÓBCE TARCIOWEJ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

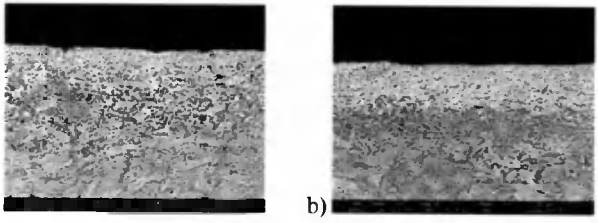
1. WPROWADZENIE

W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się duże zainteresowanie technikami wykorzystującymi zjawisko tarcia do spajania materiałów trudnych do połączenia metodami tradycyjnymi, jak również w procesach modyfikacji właściwości eksploatacyjnych warstwy wierzchniej, zwłaszcza elementów stalowych i tworzenia cienkich, metalicznych powłok ochronnych [1,2]. W szerszym rozumieniu, dotyczy to metod FSW (*Friction Stir Welding*) i FSP (*Friction Stir Processing*) z mieszaniem materiału zgrzeiny za pomocą narzędzia obróbczego w formie wirującego trzpienia. Wyróżnione techniki cechuje odmienny od standardowych metod sposób aktywacji pola cieplnego, który determinuje korzystne jakościowo zmiany własności połączeń zgrzewanych i modyfikowanych warstw powierzchniowych. W technologiach FSW i FSP wzrost temperatury w obszarze łączonych materiałów pod wpływem obracającego się narzędzia, powoduje wzrost plastyczności i płynięcie materiałów, co prowadzi do wytworzenia dyfuzyjnego połączenia z małym udziałem własnych naprężeń w rejonie zgrzeiny i w strefie wpływu ciepła. Wytrzymałość zmęczeniowa połączenia, wykonanego tą techniką jest porównywalna z wytrzymałością materiału rodzimego.

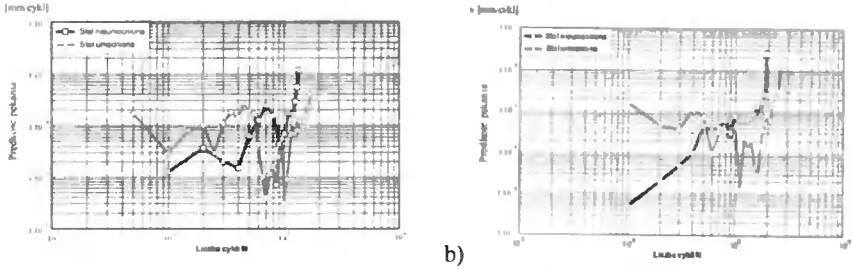
2. WYNIKI BADAŃ

W pracy analizowano wpływ powierzchniowej obróbki tarciowej, zastosowanej dla próbek z karbem ze stali niestopowej S235JR i S355J2, na przebieg prędkości zmęczeniowego pękania w powietrzu. Przedstawiono wyniki z badań porównawczych tej prędkości w próbkach umocnionych techniką tarciową i w próbkach nieumocnionych przy niesymetrycznym rozciąganiu ($R = -0,2$). Badano próbki płaskie z obustronnym karbem brzegowym, wycięte z arkuszy blach stali S235JR i S355J2 o grubości 12 mm. Obróbkę tarciową wykonano z użyciem wirującego dysku. Jest to inny rodzaj obróbki tarciowej w porównaniu z metodami FSW i FSP. Celem działań było podwyższenie właściwości eksploatacyjnych i zmęczeniowych warstwy wierzchniej wymienionych stali, przeznaczonych do eksploatacji w środowisku wody morskiej [3]. Parametry tej obróbki, to jest prędkość obrotową dysku, prędkość liniową przesuwu stołu i siłę docisku dysku do umacnianej powierzchni dobrano na podstawie badań metalograficznych zgładów umocnionych próbek. Po dwukrotnym przejściu narzędzia wzdłuż osi próbek warstwa wierzchnia obu stali została plastycznie umocniona średnio do głębokości około 200-250 μm. W warstwie tej stwierdzono rozdrobnienie ziaren stali do wielkości 20-50 nm. Obróbkę powierzchniową próbek wykonał zespół ukraiński ze Lwowa. Zdjęcia plastycznie odkształconej warstwy wierzchniej w stali S235 i w S355, widocznej na zgładach wzdłużnych, przedstawiono na rysunkach 1a i 1b. W wyniku zastosowanej

obróbki tarciowej, w warstwie powierzchniowej próbek z obu stali stwierdzono obecność własnych naprężeń rozciągających, a od głębokości 0,1 mm – obecność naprężeń ściskających σ_{xx} i σ_{yy}. Na przebieg pękania próbek stalowych oddziaływał zarówno układ naprężeń własnych, jak również naprężenia resztkowe pozostałe w blachach po procesie wytwórczym. Przykładowe przebiegi prędkości zmęczeniowego pękania w powietrzu próbek nie umocnionych (krzywa niebieska) i umocnionych (krzywa czerwona) z badanych stali przy naprężeniu $\sigma_{max} = 85$ MPa ($R = -0,2$) przedstawiono odpowiednio na rysunku 2a i 2b. Wyniki z badań wskazują na wyższą prędkość pękania umocnionych próbek stalowych aniżeli próbek bez obróbki podczas pękania PSO. Ten etap pękania próbek przypadał na większą część ich trwałości. Pękanie w PSN było szybsze w próbkach nie umocnionych. W konsekwencji, trwałość zmęczeniowa próbek umocnionych była średnio o 10-15% wyższa niż próbek w stanie dostawy.



Rys. 1. Obraz plastycznie odkształconej warstwy wierzchniej stali S235 (a) i stali S355 (b) po zastosowaniu obróbki tarciowej



Rys. 2. Przebiegi prędkości pękania w powietrzu próbek ze stali S235 (a) i stali S355 (b) nie umocnionych i umocnionych powierzchniowo przy naprężeniu $\sigma_{max} = 85$ MPa

LITERATURA

[1] Kocańda D., Górka A., 2010. Nowe technologie łączenia tarciowego metali, Biuletyn WAT 2, Warszawa, s. 395-411.

[2] Kocańda D., Górka A., 2011. Formation of a metal coating by means of friction stir processing". [In:] ICAF 2011 Structural Integrity: Influence of Efficiency and Green Imperatives. J. Komorowski (ed.). Springer, New York, Proc. 26th ICAF Symposium, Canada, 167-178.

[3] Sprawozdanie z realizacji projektu PBG Nr N N501 0097 33 (2007-2011).

Dorota KOCAŃDA*, Stanisław MROZIŃSKI**

KUMULACJA ENERGII ODKSZTAŁCENIA W STALACH KONSTRUKCYJNYCH S235 I S355 W WARUNKACH NISKOCYKLOWEGO NIESYMETRYCZNEGO OBCIĄŻENIA

* Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Mechaniczny,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

W pracy skupiono uwagę na energetycznym opisie niskocyklowego zmęczenia dla dwóch stali niestopowych S235JR (St3S) i S355J2 (18G2A) w warunkach niesymetrycznego rozciągania (R = –0,2). Stale te są typowymi stalami konstrukcyjnymi przeznaczonymi w kraju do szerokiego zastosowania w różnego rodzaju konstrukcjach spawanych . W opracowaniach tematycznie związanych z tym zagadnieniem proponuje się różne podejścia do opisu zmęczenia niskocyklowego stali. O niektórych z nich nadmieniono w materiałach konferencyjnych XXIII Sympozjum Zmęczenia i Mechaniki Pękania [1]. W pracy tej przedstawiono wyniki badań doświadczalnych w zakresie niskocyklowego zmęczenia stali S235JR, otrzymane dla obciążenia cyklami symetrycznymi (R = –1) i niesymetrycznymi o współczynniku R = –0,2 dla pięciu różnych wartości naprężenia średniego, przy czym największa wartość amplitudy odkształcenia całkowitego była równa ε_{ac} = 1%. Otrzymano dość zaskakujący wniosek z tych badań, że współczynnik asymetrii cyklu R, a zatem i naprężenie średnie σ_m, nie mają praktycznie wpływu na wielkość kumulowanej energii w materiale i trwałość zmęczeniową stali. Wynik ten nie jest zgodny z analizami i wynikami doświadczalnymi prezentowanymi w literaturze dla R ≥ 0. W opisie właściwości cyklicznych stali wzięto pod uwagę tylko kumulację energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} w każdym cyklu ustabilizowanych pętli histerezy. Energia plastycznej deformacji ΔW_{pl} , absorbowana przez jednostkową objętość materiału w czasie jednego cyklu obciążenia, równa jest polu pętli histerezy. Z tego względu dla jej poprawnego oszacowania istotny jest analityczny opis kształtu pętli histerezy.

W celu sprawdzenia otrzymanego wyniku z badań, to jest niezależności wpływu naprężenia średniego na wielkość energii skumulowanej w stali S235JR i na jej trwałość zmęczeniową przy wymuszeniu cyklami o wartości współczynnika R = –0,2 rozszerzono o dwa dalsze poziomy zakres zadawanych wymuszeń odkształceniem ε_{ac} = const dla próbek ze stali S235JR i S355J2 do wartości 3% (łącznie siedem poziomów ε_{ac}). Tym samym, analizą porównawczą objęte zostaną też większe odkształcenia plastyczne. Takie zadanie badawcze i opracowanie wyników z tych badań jest przedmiotem prezentowanej pracy.

2. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

Analizę zmian własności cyklicznych stali S235J2 i S355J2 w warunkach obciążenia symetrycznego i niesymetrycznego R = –0,2, przy wymuszeniu odkształceniem

ε_{ac} = const, prowadzono z wykorzystaniem najważniejszych parametrów pętli histerezy, to jest ε_{ac}, ε_{apl}, ε_{ae}, σ_a. Obserwowano zmiany kształtu pętli histerezy oraz jej parametrów na wszystkich siedmiu poziomach odkształcenia ε_{ac} dla obu stali. Wielkości zmian właściwości cyklicznych zależały od poziomu zadawanego odkształcenia całkowitego ε_{ac}. Charakter przebiegu zmian amplitudy naprężenia $\sigma_a = f(2N)$ i amplitudy odkształcenia plastycznego $\varepsilon_{apl} = f(2N)$ na każdym poziomie $\varepsilon_{ac,i}$ był jednakowy dla dwóch współczynników R = –1 i R = –0,2. Analizy przeprowadzone dla pętli histerez zarejestrowanych w trakcie badań zmęczeniowych dla współczynnika R = –1 i R = –0,2 udowodniły, że jeśli dokona się przesunięcia pętli histerez dla R = –0,2 o wartość $\varepsilon_{m,i}$ do pokrycia się z histerezami zarejestrowanymi dla R = –1, to pętle te wzajemnie do siebie przylegają. Są identyczne. O tej stałości pola histerez, a więc także o stałości energii kumulowanej w każdym cyklu obciążenia, przy wymuszeniu odkształceniem ε_{ac} = *const,* niezależnie od umocnienia lub osłabienia materiału, wspomina się w pracy [2].

Zatem, podejście obliczeniowe niskocyklowej trwałości zmęczeniowej elementów, uwzględniające kumulację energii odkształcenia plastycznego ΔW_{pl} w każdym cyklu ustabilizowanych pętli histerezy, czyli:

$$\Sigma \Delta W_{pl} = N_f \cdot \Delta W_{pl} \tag{1}$$

oraz podejście wykorzystujące gęstość energii całkowitej odkształcenia ΔW w postaci:

$$\Delta W = \frac{1}{2}\Delta W_{pl} + \frac{1}{2}\Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon \tag{2}$$

jako parametr zniszczenia, mają zastosowanie tylko do cykli symetrycznych [2]. Natomiast, nie są wrażliwe na naprężenia średnie.

Po to, aby uwzględnić wpływ naprężeń średnich σ_m lub średniego odkształcenia ε_m na niskocyklową trwałość zmęczeniową elementów, należy wziąć pod uwagę sumę energii plastycznej ΔW_{pl} i część energii sprężystej odpowiadającej naprężeniom rozciągającym ΔW_{sp}^{+} [2] zgodnie z równaniem (3):

$$\Delta W_{tot} = \Delta W_{pl} + \Delta W_{sp}^{+} \quad \text{czyli} \quad \Delta W_{tot} = \frac{1-n'}{1+n'}\Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon_{pl} + \frac{1}{2E} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma_m\right)^2 \tag{3}$$

gdzie: n' jest wykładnikiem cyklicznego odkształcenia materiału.

LITERATURA

[1] Kocańda D., Mroziński S., 2010. Kumulacja energii w stali S235 w warunkach niesymetrycznego obciążenia. Mat. XXIII Sympozjum ZiMP, Pieczyska.
[2] Kujawski D., 1991. Trwałość zmęczeniowa metali. Wyd. Politechniki Warszawskiej.

Janusz KOZAK, Karol NIKLAS

PROBLEMY MODELOWANIA NUMERYCZNEGO DLA OKREŚLANIU POLA NAPRĘŻEŃ W TEOWYM POŁĄCZENIU SPAWANYM LASEROWO STALOWEJ KONSTRUKCJI TYPU SANDWICH

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

W ostatnich latach obserwowane jest zwiększone zapotrzebowanie przemysłu na metalowe konstrukcje typu sandwich. Konstrukcje te składają się z cienkich poszyć o grubości około 2,5 mm oddzielonych usztywnieniami o różnym kształcie i formie. Najczęściej spotykaną formą usztywnienia jest płaskownik o wysokości np. 40 mm prostopadły do poszycia, rozmieszczony z odstępem 250 mm. Wymiary gabarytowe paneli sandwichowych sięgają 10 metrów. Blachy okładek i usztywnień konstrukcji połączone są ze sobą przy pomocy nietypowej technologii spawania laserowego. Złącze wykonywane jest od zewnętrznej strony poszycia, co powoduje powstanie niepełnego przetopu od strony grani spoiny. W efekcie wewnątrz konstrukcji w miejscu niedostępnym dla skontrolowania powstają szczeliny zakończone bardzo ostrymi karbami geometrycznymi. Spoina powstaje na skutek stopienia blachy poszycia bez materiału dodatkowego. Powstałe złącze jest bardzo wąskie i wydłużone ze względu na bardzo lokalne źródło ciepła. Geometrie poszczególnych połączeń spawanych różnią się między sobą, niekiedy znacznie, co dodatkowo komplikuje ich analizę. Co więcej zastosowanie techniki spawania laserowego wpływa na powstanie nietypowego rozkładu zmian własności materiałowych w strefach spoiny. W efekcie powstaje złącze, którego zachowanie pod obciążeniem znacząco odbiega od spawanego połączenia teowego wykonywanego metodami klasycznymi. Obliczenia trwałości zmęczeniowej tego typu złączy mogą być prowadzone w oparciu o lokalne wartości naprężeń w karbach, do których wyznaczenia mogą służyć obliczenia numeryczne metodą elementów skończonych. Jednakże z uwagi na obecność wspomnianych karbów, poprawne zamodelowanie tak złożonej geometrii nie jest zadaniem prostym. W referacie skupiono się na wpływie modelowania numerycznego na wyniki koncentracji odkształceń i naprężeń w spoinie laserowej.

Marta KUREK, Krzysztof KLUGER, Tadeusz ŁAGODA

BADANIA SYMULACYJNE WPŁYWU NIERÓWNOLEGŁOŚCI CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH NA SZACOWANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WPROWADZENIE

Wiele kryteriów wieloosiowego zmęczenia uwzględnia w swoich równaniach wartość stosunku:

$$B = \sigma_{af}/\tau_{af}, \tag{1}$$

gdzie: σ_{af} – granica zmęczenia dla zginania, τ_{af} – granica zmęczenia dla skręcania.

Zależnością taką jest kryterium opracowane przez Gougha i Pollarda (1951), których badania zapoczątkowały obszerne prace nad zginaniem i skręcaniem. Kolejne propozycje kryteriów uwzględniających wartość równania (1) przedstawili: Nisihara i Kawamoto (1941), Lee (1985), Findley (1959), Stulen i Cummings (1987) oraz Carpinteri i Spagnoli (2001).

W pracy [1] przedstawiono zależność (1) dla wybranych materiałów konstrukcyjnych i wyznaczono grupę, dla której zależność ta wykazuje stałość. W takim przypadku obliczenie trwałości zmęczeniowej umożliwiają wyżej wymienione hipotezy. W przypadku pozostałych materiałów nie ma spójnego rozwiązania umożliwiającego ocenę trwałości zmęczeniowej, ponieważ należy uwzględnić zmienność stosunku:

$$B(N_f) = \sigma_a(N_f)/\tau_a(N_f) \tag{2}$$

w zależności od liczby cykli do zniszczenia zmęczeniowego.

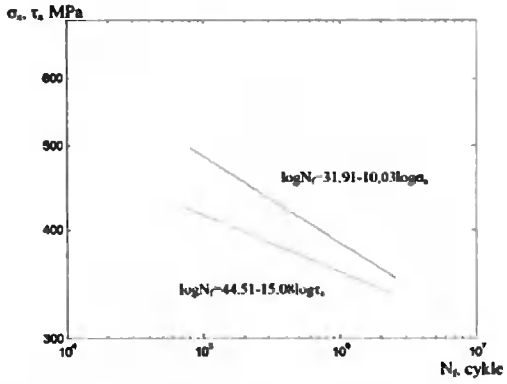
W pracy przedstawiono badania symulacyjne wpływu nierównoległości charakterystyk zmęczeniowych na przewidywanie trwałości zmęczeniowej.

2. BADANE MATERIAŁY

Do analizy wykorzystano materiały, które charakteryzują się brakiem równoległości wzajemnych charakterystyk zmęczeniowych. Takimi właściwościami charakteryzują się mosiądz CuZn40Pb2, stal średniostopowa 30CrNiMo8 oraz stal wysokostopowa 35NCD16. Na rys. 1 przedstawiono wykres zmęczeniowy dla czystego zginania i czystego skręcania dla 35NCD16.

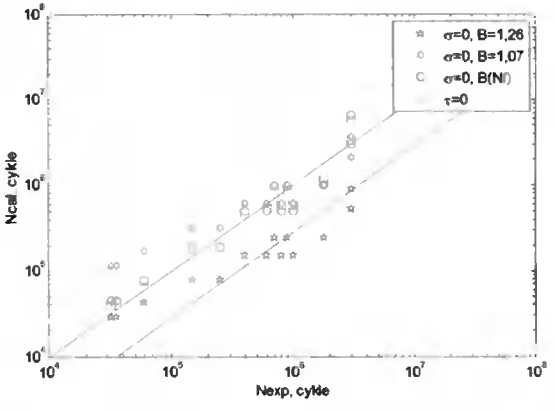
3. BADANIA SYMULACYJNE

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu nierównoległości charakterystyk zmęczeniowych na szacowanie trwałości zmęczeniowej.



Rys. 1. Wykres zmęczeniowy dla czystego zginania i czystego skręcania dla 35NCD16

Obliczono trwałość zmęczeniową wykorzystując algorytm z pracy [1]. Trwałości wyliczono przy różnej wartości parametru B wyznaczonego, gdy $N_f = 10^4$ i $N_f = 10^6$ oraz dla $B(N_f)$. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki analizy, z której wynika, że najlepszy rezultat otrzymano, gdy $B(N_f)$.



Rys. 2. Porównanie trwałości obliczeniowej Ncal z trwałością eksperymentalną Nexp stali 35NCD16 przy różnych wartościach parametru B

LITERATURA

[1] Kurek M., Łagoda T., 2012. Fatigue life estimation under cyclic loading including out-of-parallelism of the characteristics. Applied Mechanics and Materials 104, 125-132.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/N/ST8/06900.

Marta KUREK, Tadeusz ŁAGODA

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ BLOKOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM NIERÓWNOLEGŁOŚCI WZAJEMNYCH CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH

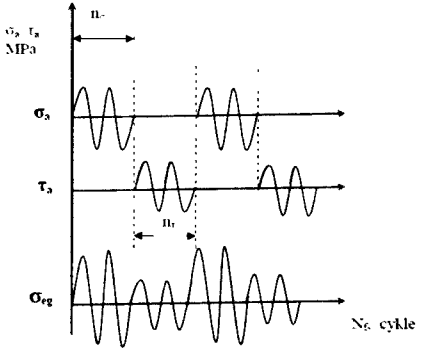
Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. CEL PRACY

Celem pracy jest zaprezentowanie algorytmu szacowania trwałości zmęczeniowej przy obciążeniach blokowych dla materiałów cechujących się brakiem równoległości wzajemnych charakterystyk zmęczeniowych. Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla próbek wykonanych z mosiądzu CuZn40Pb2.

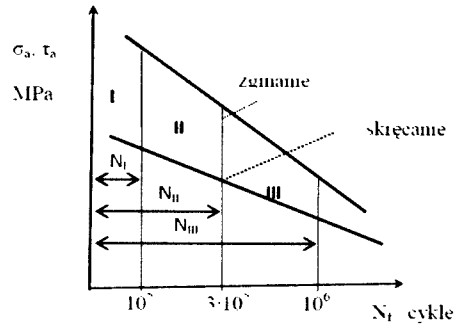
2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Autorzy [1] poddali badaniom 36 próbek na różnych poziomach obciążenia i o różnej kolejności tych poziomów. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy fragment przebiegu naprężeń pochodzących od zginania, skręcania i ekwiwalentnych w płaszczyźnie krytycznej.



Rys. 1. Fragment przebiegu naprężeń

W eksperymencie wykorzystano 4 próbki dla każdej z kombinacji naprzemiennych bloków skręcania i zginania. Blok był złożony z n_τ cykli skręcania i n_σ cykli zginania, każdy o przebiegu sinusoidalnym. Do badania przyjęto okresy, które stanowiły 10% trwałości na danym poziomie obciążenia dla N_I, N_{II} i N_{III} (rys. 2). W związku z tym momenty powodujące zginanie oraz skręcanie zadawane były przemiennie i trwały po odpowiednio $n_I = 10^4$, $n_{II} = 3 \cdot 10^4$ lub $n_{III} = 10^5$ cykli, aż do momentu zniszczenia próbki.



Rys. 2. Zastosowane bloki obciążeń [1]

3. ALGORYTM OCENY TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIWEJ

W pracy wyznaczono położenie płaszczyzny krytycznej za pomocą metody kumulacji uszkodzeń, która polega na kumulowaniu uszkodzeń zmęczeniowych na wszystkich możliwych płaszczyznach. W przypadku obciążeń blokowych wyliczono kumulację odpowiednio dla zginania i skręcania. Po zsumowaniu kumulacji wyszukano kąt, dla którego wartość kumulacji była maksymalna. W pracy zastosowano kryteria w płaszczyźnie maksymalnych naprężeń stycznych [2], w którym uwzględniono zmienność stosunku naprężeń normalnych do stycznych w zależności od liczby cykli. Prezentowany model jest oparty na metodzie iteracji. Początkowa liczba cykli przyjęta do obliczenia pierwszego cyklu pracy algorytmu wynosi $N_i = 10^6$.

4. WERYFIKACJA I WNIOSKI

Po analizie wyników porównania trwałości obliczeniowej z eksperymentalną można stwierdzić, że zaproponowany algorytm szacowania trwałości zmęczeniowej daje zadowalające wyniki.

LITERATURA

[1] Kohut M., Łagoda T., 2007. Trwałość zmęczeniowa elementów wykonywanych z mosiądzu MO58 w warunkach blokowych obciążeń skręcających I zginających, Problemy rozwoju maszyn roboczych Konferencja Naukowa Zakopane, 165-167.

[2] Łagoda T., Ogonowski P., 2005. Criteria of multiaxial random fatigue based on stress, strain and energy parameters of damage in the critical plane, Mat.-wiss. u. Werkstofftech 36(9), 429-437.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/N/ST8/06900.

Andrzej KUREK, Adam NIESŁONY

BADANIA ZMĘCZENIOWE BIMETALU STAL-TYTAN ZGRZEWANEGO METODĄ WYBUCHOWĄ

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WSTĘP

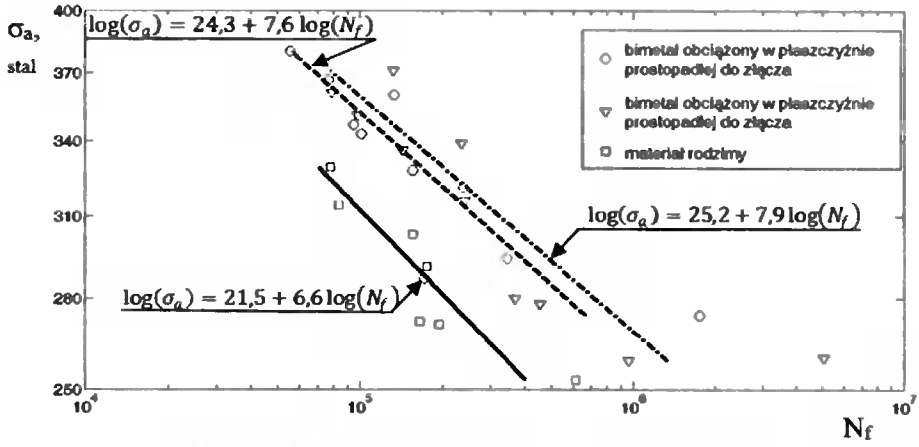
Badania wytrzymałościowe prezentowane w pracy dotyczą kompozytu metalicznego, zwanego platerem, uzyskiwanego podczas tak zwanego platerowania wybuchowego [1].

W pracy przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych materiału platerowanego będącego połączeniem stali S355J2 z tytanem SB265 G1 – materiałem nakładanym oraz samej stali będącej materiałem rodzimym. Ze względu na grubość warstwy nakładanej – tytanu (6 mm) do testów zmęczeniowych zastosowano próbki o nienormatywnych wymiarach i kształcie. Przed przystąpieniem do badań należało określić kształt próbek. W tym celu posłużono się obliczeniami MES dla określenia wielkości i kształtu karbu gwarantującego nieznaczne spiętrzenie naprężenia w dnie karbu, w okolicy którego założono, że nastąpi inicjacja pęknięcia zmęczeniowego [2].

Próbki o opracowanym kształcie (100x9x9 mm) wykorzystano do badań zmęczeniowych, które przeprowadzono na maszynie MZGS-100. Próbki wykonano tak, aby złącze bimetalu przebiegało dokładnie w połowie ich przekroju, dzieląc próbkę na dwie równe części – stalową i tytanową.

2. BADANIA ZMĘCZENIOWE

W pierwszej serii badań próbkę zamocowano w maszynie tak, aby zginanie było realizowane w płaszczyźnie prostopadłej do złącza bimetalu. Dla tego typu badania przeprowadzono wstępnie trzy próby zmęczeniowe, które były także prezentowane w pracy [3], a następnie uzupełniono je o kolejne siedem. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 3. Oznaczono je jako próbki obciążane prostopadle do płaszczyzny złącza bimetalu. Kolejną serię badań przeprowadzono przy innej konfiguracji obciążenia plateru, próbkę zamocowano w maszynie tak, aby wektor siły zginającej działał w płaszczyźnie złącza bimetalu. Wyniki testów zestawiono na rysunku 3 i oznaczono jako próbki obciążone równolegle do płaszczyzny złącza bimetalu. Trzecią serię badań przeprowadzono na próbkach wykonanych z materiału rodzimego (stali S355J2), które zostały pozyskane z płyt po zgrzewaniu wybuchowym. Po to, aby istniała możliwość odniesienia uzyskanych wyników badań do dwóch poprzednich testów, zastosowano próbki o kształcie i wymiarach próbek użytych do pierwszej i drugiej serii badań. Wyniki tych testów zamieszczono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność amplitudy naprężenia σ_a od liczby cykli N_f

3. ANLIZA WYNIKÓW

Dla większości badanych próbek bimetalu obciążonych w płaszczyźnie prostopadłej do złącza materiałem, w którym następowała inicjacja pęknięcia, był tytan SB265 G1, który pomimo dużej różnicy modułów Younga łączonych materiałów determinującej niższą wartość naprężenia, charakteryzował się mniejszą trwałością zmęczeniową. W przypadku próbek zginanych w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny złącza, do inicjacji pęknięcia doszło w warstwie stalowej bimetalu. Dlatego też, przy projektowaniu elementów maszyn wykonanych z bimetalu należy skorzystać z charakterystyk zmęczeniowych uwzględniających własności zmęczeniowe zarówno materiału podstawowego, jak i nakładanego.

W przypadku badań próbek obciążonych równolegle do płaszczyzny złącza różnica amplitudy naprężenia występującego w stali i tytanie jest większa, w związku z tym proces inicjacji pęknięcia zachodził będzie wcześniej w części stalowej bimetalu. Z badań wynika również, iż trwałość zmęczeniowa próbek wykonanych z materiału rodzimego, pozyskanego z plateru, jest mniejsza od trwałości próbek tytan-stal. Ponadto wykazano, iż zmiana sposobu obciążenia bimetalu wpływa na jego trwałość zmęczeniową. Próbka obciążona równolegle do płaszczyzny złącza ma nieznacznie większą trwałość.

LITERATURA

[1] Szulc Z., Gałka A., Bański R., Pocica A., 2007. Platerowanie wybuchowe tytanem – rozwój technologii i obszary przemysłowych zastosowań. XII Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza Postęp, innowacje i wymagania jakościowe procesów spajania. Międzyzdroje, 13-14.

[2] Niesłony A., Kurek A., Bański R., Čižek L., 2010. Badania wytrzymałościowe statyczne i zmęczeniowe materiałów zgrzewanych wybuchowo typu stal-tytan. Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej, Mechanika 97, 41-42.

[3] Kurek A., Żok F., Niesłony A., Bański R., 2011. Badania wytrzymałościowe platerów typu stal-tytan zgrzewanych metodą wybuchową. XXIV Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane, 47-49.

Andrzej KUREK, Adam NIESŁONY, Robert BAŃSKI

ANALIZA NUMERYCZNA STANU NAPRĘŻENIA W OKOLICY ZŁĄCZA MATERIAŁÓW PLATEROWANYCH METODĄ WYBUCHOWĄ

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WSTĘP

Technologia zgrzewania wybuchowego pozwala na trwałe połączenie materiałów o bardzo odmiennych właściwościach, które trudne jest do osiągnięcia innymi technikami spajania materiałów [1]. Uzyskane tą metodą platery są materiałami o właściwościach silnie gradientowych oraz posiadają złożony charakter strefy połączenia. Jednym z podstawowych obszarów stosowania materiałów platerowanych są konstrukcje aparatów procesowych w przemyśle energetycznym i chemicznym. Szerokie zastosowanie tytanu i jego stopów między innymi w energetyce (skraplacze, kondensatory pary, wymienniki ciepła oraz turbiny parowe w elektrowniach i elektrociepłowniach) sprawia, że nie tylko ważna jest wytrzymałość statyczna, którą określa się za pomocą odpowiednich testów normatywnych lub branżowych [1, 2], ale i trwałość zmęczeniowa.

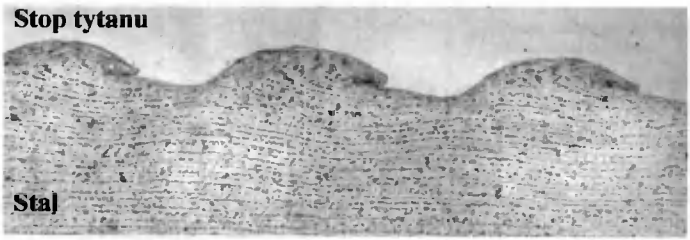
Obliczając trwałość zmęczeniową elementów maszyn i konstrukcji, wykorzystuje się charakterystyki zmęczeniowe materiału wyznaczane przy obciążeniu stało-amplitudowym. Są to najczęściej charakterystyki naprężeniowe, w przypadku których kluczową sprawą jest prawidłowe oznaczenie amplitudy naprężenia. W przypadku materiałów platerowanych są minimum dwa materiały i z tak zwaną strefą złącza, która charakteryzuje się pewną falistością i właściwościami znacząco różnymi od materiałów podstawowych plateru. Poprawne sporządzenie charakterystyki zmęczeniowej ma więc kluczowe znaczenie podczas szacowania trwałości zmęczeniowej, szczególnie gdy zakładany jest zmienno-amplitudowy charakter obciążenia [3-5].

2. BADANIA SYMULACYJNE

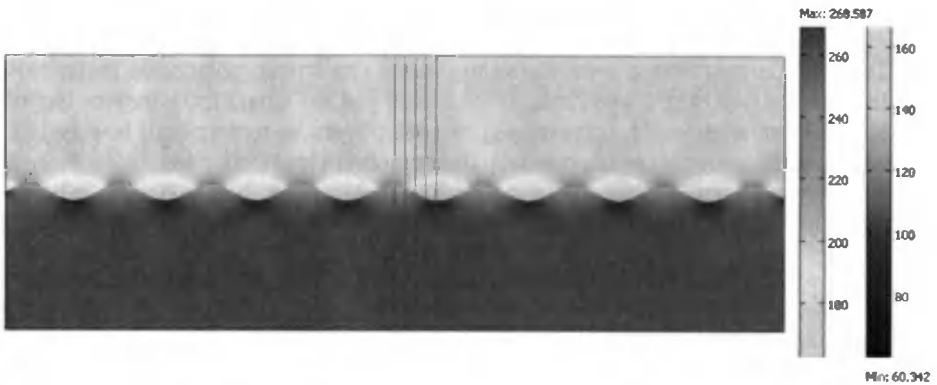
W pracy przedstawiono metodologię modelowania rozkładów naprężeń strefy złącza przy pomocy obliczeń MES. Wykonano różne modele próbek stal-tytan wykonanych metodą platerowania wybuchowego, traktując strefę złącza jako bezpośrednie połączenie dwóch jednorodnych materiałów, modelując ją przy pomocy funkcji sinus oraz dokładnie odwzorowując kształt rzeczywistego połączenia.

Do obliczeń użyto środowiska COMSOL 3.5, za model przyjęto rzeczywisty kształt próbek wykorzystywanych w badaniach zmęczeniowych prowadzonych na maszynie MZGS-100 będącej na wyposażeniu Katedry Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej [3].

Rzeczywisty kształt połączenia uzyskano, wykonując zdjęcie mikroskopowe złącza próbki wykorzystanej do badań zmęczeniowych jak na rysunku 1, natomiast na rysunku 2 przedstawiono przykładowy rozkład naprężenia zredukowanego według hipotezy Hubera-Misesa w okolicy fali modelowanej sinusoidą dla próby rozciągania.



Rys. 1. Przykładowa fala połączenia stal-tytan charakterystyczna dla metody platerowania wybuchowego



Rys. 2. Rozkład naprężenia w okolicy fali modelowanej sinusoidą (hipoteza Hubera-Misesa, MPa) dla rozciągania.

LITERATURA

[1] Niesłony A., Kurek A., Bański R., Čižek L., 2010. Badania wytrzymałościowe statyczne i zmęczeniowe materiałów zgrzewanych wybuchowo typu stal-tytan. Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej, Mechanika 97, 41-42.

[2] Kurek A., Żok F., Niesłony A., Bański R., 2011. Badania wytrzymałościowe platerów typu stal-tytan zgrzewanych metodą wybuchową, XXIV Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane, 47-49.

[3] Kurek A., Niesłony A., 2012. Obliczanie trwałości zmęczeniowej elementów maszyn wykonanych z materiałów bimetalicznych. XXV Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane, 37.

[4] Kurek A., Niesłony A., 2011. Wpływ rodzaju charakterystyki zmęczeniowej na trwałość obliczeniową przy obciążeniu losowym. XXIV Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane, 46.

[5] Niesłony A., Kurek A., El Dsoki CH., Kaufmann H., 2012. A Study of Compatibility Between two Classical Fatigue Curve Models based on Some Selected Structural Materials. International Journal of Fatigue 39, 88-94.

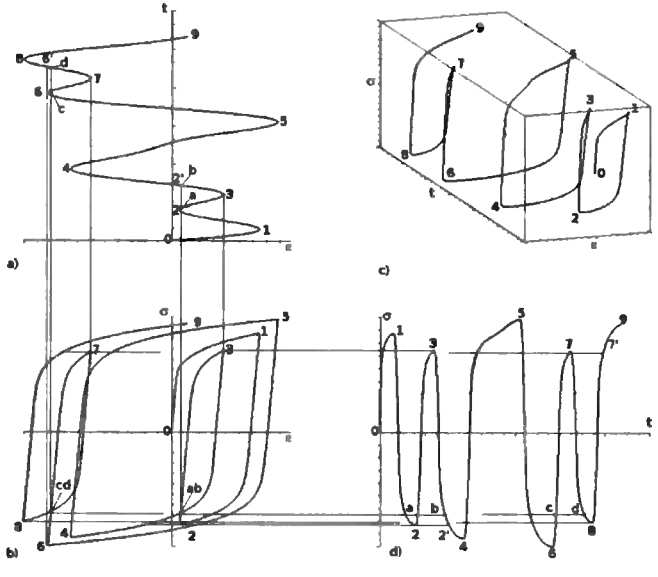
Cyprian T. LACHOWICZ

METODA IDENTYFIKACJI PĘTLI HISTEREZY

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WPROWADZENIE

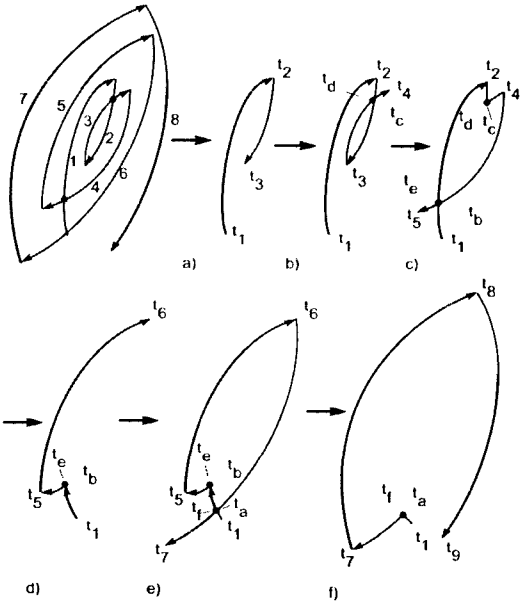
Ważnym etapem opisu obciążenia zmęczeniowego jest zastąpienie jego przebiegu czasowego zbiorem par i pojedynczych zakresów, np. metodą płynącego deszczu [1]. Na rysunkach 1a i 1d przedstawiono przykład jej zastosowania do opisu przebiegów czasowych naprężenia $\sigma(t)$ i odkształcenia $\varepsilon(t)$, tworzących pętle histerezy oraz zaprezentowano zidentyfikowane pary i pojedyncze zakresy. Dla przebiegu $\varepsilon(t)$ wyróżniono dwie pary zakresów (2-3-2') oraz (6-7-6'). W przebiegu $\sigma(t)$ wyodrębniono (2-3-2') i (7-8-7'). Łatwo spostrzec, że ostatnia para zakresów jest inna i nie tworzy zamkniętej pętli. Stawia to pod znakiem zapytania stwierdzenia, spotykane często w literaturze [2], o możliwości wykorzystania metody płynącego deszczu do identyfikacji pętli histerezy.



Rys. 1. Pętla histerezy sprężysto-plastycznej jako złożenie dwóch funkcji parametrycznych zależnych od czasu

2. OPIS METODY

Porównując rysunkach 1b z 1c, można spostrzec, że charakterystyczny kształt pętli histerezy jest efektem rzutowania krzywej $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, zadanej parametrycznie funkcjami $\varepsilon(t)$ i $\sigma(t)$ na płaszczyznę ε-σ. W żadnym przypadku parametryczny charakter funkcji $\sigma(\varepsilon)$ nie dopuszcza do „przecinania się" jej gałęzi. Na rysunku 2 przedstawiono kolejne etapy proponowanej metody analizy wielokrotnie zagnieżdżonych pętli histerezy.



Rys. 2. Graficzna prezentacja proponowanej idei identyfikacji pętli histerezy

Znalezione pętle to (tc-3,t3-d), (tb-2,t2-c,td-4,t4-e), (ta-b,te-5,t5-6,t6-f).

Algorytm identyfikacji pętli można ująć w następujących punktach:

1. Analiza polega na poszukiwaniu punktu przecięcia dwóch następujących po sobie (w czasie) gałęzi, niekoniecznie sąsiednich.
2. Gałęzią podstawową jest zawsze gałąź druga.
3. Gałęzią pierwszą może być dowolna gałąź lub jej fragment, pojawiający się wcześniej niż gałąź druga.
4. Znalezienie punktu przecięcia gałęzi powoduje wygenerowanie zamkniętej pętli.
5. W kolejnym kroku algorytm wczytuje kolejną gałąź podstawową i szuka jej punktu przecięcia z gałęzią pierwszą. Jako gałąź pierwszą przyjmuje się kolejno, aż do wyczerpania, gałęzie zapisane na liście.
6. Brak punktu przecięcia lub wyczerpanie się listy powoduje przesunięcie gałęzi podstawowej na pozycję gałęzi pierwszej i doczytanie kolejnej gałęzi podstawowej.

LITERATURA

[1] Matsuishi M., Endo T., 1968. Fatigue of Metals subjected to Varying Stress – Fatigue Lives Under Random Loading. Proceedings of the Kyushu District Meeting, JSME, 37-40.

[2] McInnes C. H., Meehan P. A., 2008. Equivalence of four-point and three-point rainflow cycle counting algorithms, int. J. of Fatigue 30, 547-559.

Bogdan LIGAJ, Grzegorz SZALA

PORÓWNANIE WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH STALI C45 W ZAKRESIE NISKOCYKLOWEGO ZMĘCZENIA W WARUNKACH STEROWANIA NAPRĘŻENIEM I ODKSZTAŁCENIEM

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

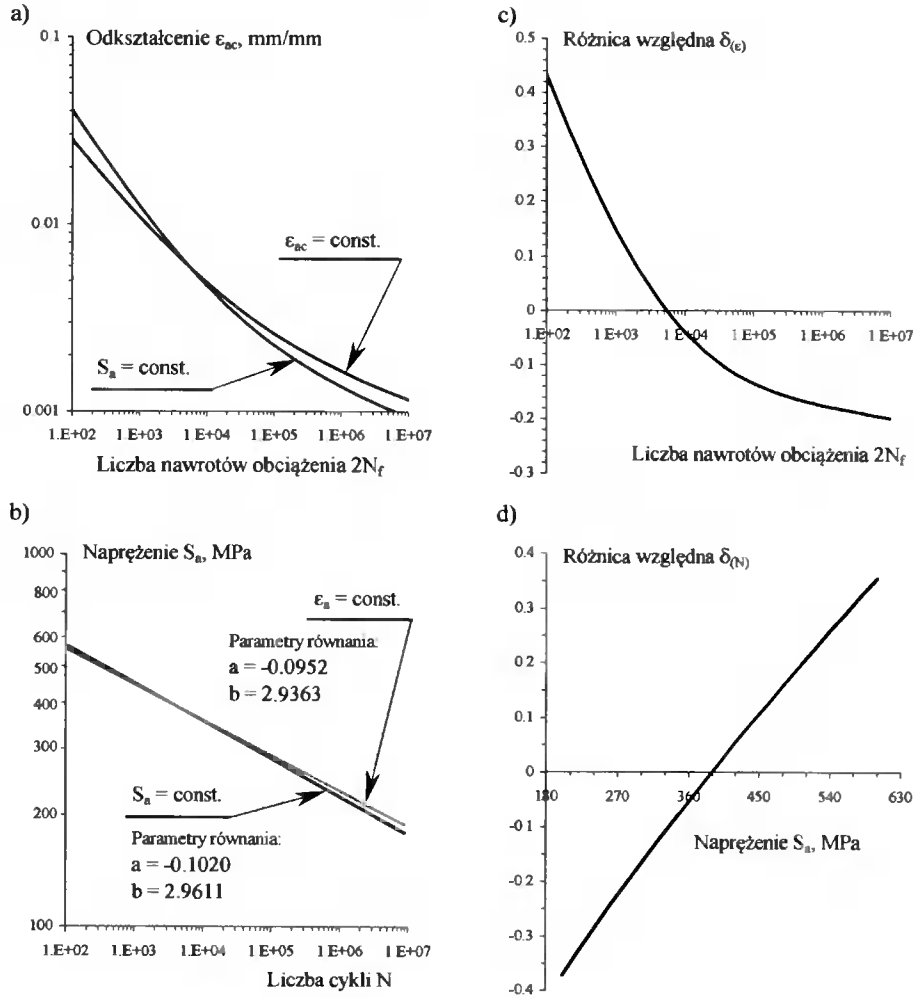
Elementy konstrukcyjne maszyn w warunkach eksploatacji podawane są obciążeniom o charakterze losowym, które wynikają z dynamicznego lub kinematycznego wymuszenia. Wymuszenie dynamiczne związane jest działaniem siły, momentów zginających czy też momentów skręcających. Z wymuszeniem kinematycznym mamy do czynienia wówczas, gdy parametrem sterującym jest odkształcenie.

Przedstawione formy realizacji obciążeń elementów konstrukcyjnych mają przełożenie na sposób realizacji badań doświadczalnych prowadzących do wyznaczenia charakterystyk zmęczeniowych. Charakterystyka zmęczeniowa wyznaczona w ujęciu naprężeniowym to tzw. wykres Wöhlera, natomiast charakterystykę w ujęciu odkształceniowym stanowią wykresy Mansona-Coffina oraz Ramberga-Osgooda.

Na tym tle w pracy sformułowano następującą hipotezę: w zależności od charakteru obciążenia zmiennego należy dobierać metody wyznaczania własności cyklicznych metali (dla obciążenia będącego wynikiem wymuszenia dynamicznego w ujęciu naprężeniowym, dla obciążenia kinematycznego w ujęciu odkształceniowym).

Na rysunku 1 przedstawiono wykresy Mansona-Coffina (rys. 1a) i Wöhlera (rys. 1b) wyznaczone przy sterowaniu: odkształceniem (ε_{ac} = const.) oraz naprężeniem (S_a = const.). Pobieżna analiza wyników badań wykazuje różnice pomiędzy charakterystykami. Wartość różnic względnych przedstawiono na rysunku 1c i 1d.

Całość pracy zamieszczona jest na płycie CD załączonej do materiałów konferencyjnych i będzie przedstawiony w trakcie obrad Sympozjum. Publikacja zawiera, m.in. analizę różnic pomiędzy wykresami wyznaczonymi w warunkach sterowania naprężeniem i odkształceniem oraz relacje pomiędzy: wykresami Wöhlera (W) a Mansona-Coffina (M-C), wykresami monotonicznego rozciągania-ściskania a wykresami Ramberga-Osgooda [1, 2]. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań sformułowano wnioski, które dotyczą powiązania charakteru obciążenia z warunkami wyznaczania wykresów zmęczeniowych.



Rys. 1. Porównanie wykresów trwałości zmęczeniowej Mansona-Coffina (a) i Wöhlera (b) wyznaczonych dla danych uzyskanych przy sterowaniu naprężeniem (dynamicznym) i odkształceniem (kinematycznym) dla stali C45 pozwalające na wyznaczenie różnic względnych pomiędzy wykresami (c i d)

LITERATURA

[1] Szala G., 2011. Analiza teoretyczna i doświadczalna dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych stali konstrukcyjnych, opracowanie monograficzne, część I zbioru monografii pt. Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, Radom.

[2] Szala J., Mroziński S., 2011. Zagadnienie cyklicznego umocnienia lub osłabienia metali w warunkach obciążenia programowanego, Acta Mechanica et Automatica 5(3), 99-107.

Praca naukowa sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w ramach projektu badawczego własnego nr 2221/B/T02/2010/39.

Bogdan LIGAJ, Grzegorz SZALA

WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ STALI 41CR4 DLA OBCIĄŻEŃ LOSOWYCH O SZEROKIM WIDMIE

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

Proces projektowania elementów konstrukcyjnych maszyn prowadzony jest dla przyjętych kryteriów, wśród których znajduje się kryterium trwałości zmęczeniowej. Realizacja obliczeń zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych jest dość złożona. Wynika to z charakteru procesu zmęczenia materiału oraz istotnego wpływu wielu czynników związanych z: geometrią elementów konstrukcyjnych, technologią ich wytwarzania, charakterem obciążeń podczas eksploatacji.

Celem pracy jest przedstawienie algorytmu obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie [1].

Na podstawie tego algorytmu przeprowadzono obliczenia trwałości zmęczeniowej stali 41Cr4 w warunkach obciążeń losowych. Uzyskane wyniki obliczeń podlegały weryfikacji doświadczalnej wykonanej na próbkach materiałowych wykonanych według normy PN-84/H-04334.

W badaniach zastosowano stal 41Cr4, którą zalicza się do grupy stali stopowych konstrukcyjnych do ulepszania cieplnego. Przyjęta stal charakteryzowała się następującymi właściwościami statycznymi: $E = 203900$ MPa, $R_m = 1395$ MPa, $R_{0,2} = 1288$ MPa. Właściwości zmęczeniowe stali 41Cr4 są następujące: $m_{(-1)} = 8{,}53$, $m_{(0)} = 9{,}95$, $C_{(-1)} = 4{,}093 \cdot 10^{28}$, $C_{(0)} = 3{,}272 \cdot 10^{31}$, $S_{f(-1)} = 448$ MPa i $S_{f(0)} = 367$ MPa. Wyznaczone dane posłużyły do opracowania dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych materiału. Przyjęte w pracy charakterystyki zostały oznaczone w sposób następujący: model I, model I-M, model II, model III, model IV i model V. Szczegółowy opis wymienionych charakterystyk został zamieszczony w pracy [2].

Obliczenia trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na podstawie dwuparametrycznego widma obciążenia w postaci tablicy korelacyjnej w układzie S_a-S_m [1]. Wymienione widmo obciążenia zostało opracowane dla losowego przebiegu naprężeń w czopie zwrotnicy samochodu osobowego. Wyniki analizy statystycznej przebiegu obciążeń pozwoliły zakwalifikować przyjęty przebieg do grupy obciążeń o szerokim widmie, które charakteryzowało się współczynnikiem $I = 0{,}6892$. Opracowane widmo obciążenia znalazło także zastosowanie w badaniach doświadczalnych na etapie modelowania obciążeń stosowanych w badaniach programowanych.

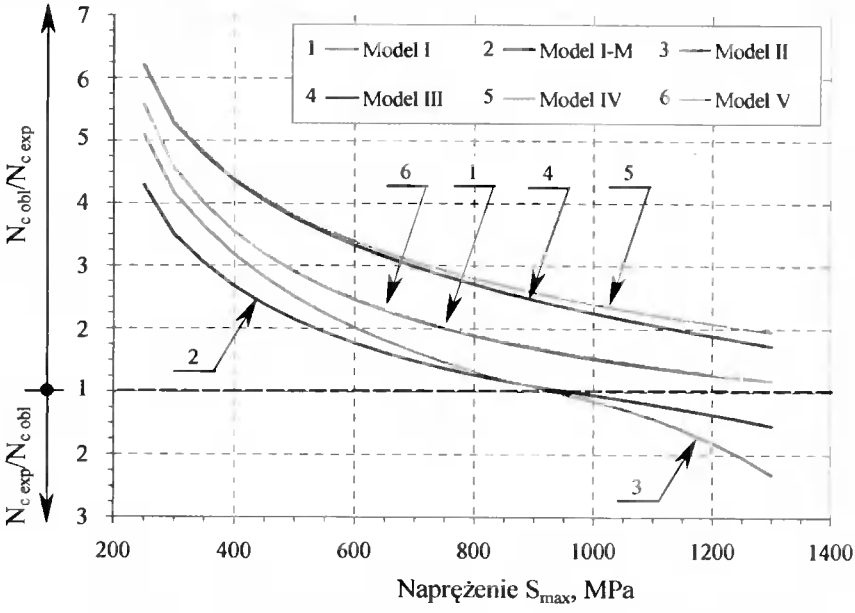
W obliczeniach trwałości zmęczeniowej zastosowano hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrana-Minera wyrażoną wzorem:

$$D = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{l} \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \tag{1}$$

natomiast liczbę cykli do pęknięcia zmęczeniowego wyznaczono ze wzoru:

$$N_{c\,obl} = \frac{1}{D} \cdot n_c \tag{2}$$

Weryfikacja doświadczalna wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej została oparta na analizie porównawczej wykresów trwałości zmęczeniowej doświadczalnej i obliczeniowej, która prowadziła do wyznaczenia wykresów stosunku $N_{c\ obl}/N_{c\ exp}$ lub $N_{c\ exp}/N_{c\ obl}$ w funkcji naprężenia maksymalnego S_{max} (rys.1).



Rys. 1. Stosunek trwałości eksperymentalnej do obliczeniowej dla stali 41Cr4 [1]

Analiza wykresów przedstawionych na rysunku 1 pozwala stwierdzić, że dla niskiej wartości naprężenia $S_{max} \approx 250$ MPa w zależności od modelu, stosunek $N_{c\ obl}/N_{c\ exp}$ waha się w granicach 4 (dla modelu IM) do 6 (dla modeli III i IV). W całym zakresie analizowanych wartości S_{max} najbliższe eksperymentalnym są wyniki obliczeń według modelu IM, a następnie w kolejności według modeli: II, I i V, III oraz IV.

LITERATURA

[1] Ligaj B., 2011. Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach losowych obciążeń szerokowidmowych. [W:] Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja. Wyd. ITE – PIB Radom.

[2] Ligaj B., Szala G., 2010. Experimental Verification of two-parametic models of fatigue characteristics by using the tests of S355J0 steel as an example. Polish Maritime Research 1, 39-50.

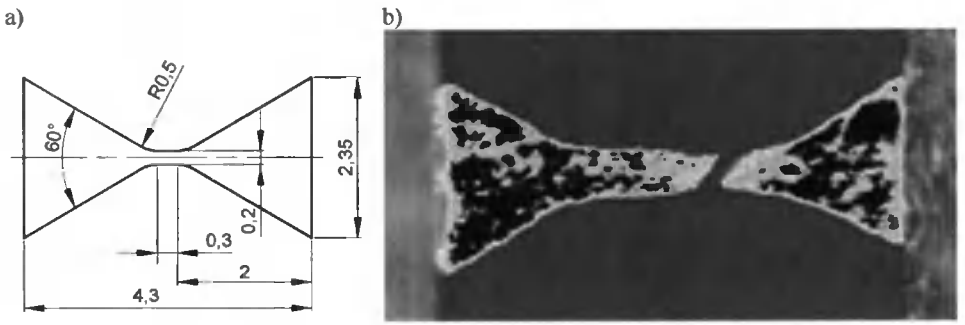
Praca naukowa sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego własnego nr 0715/B/T02/2008.

Adam LIPSKI, Dariusz BOROŃSKI

ZASTOSOWANIE TERMOGRAFII W ANALIZIE WŁASNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH MINIPRÓBEK

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono przykład zastosowania biernej termografii podczerwieni w badaniach monotonicznych i cyklicznych własności wytrzymałościowych minipróbek (rys. 1) wyciętych za pomocą lasera ze stali S355JR (18G2A).



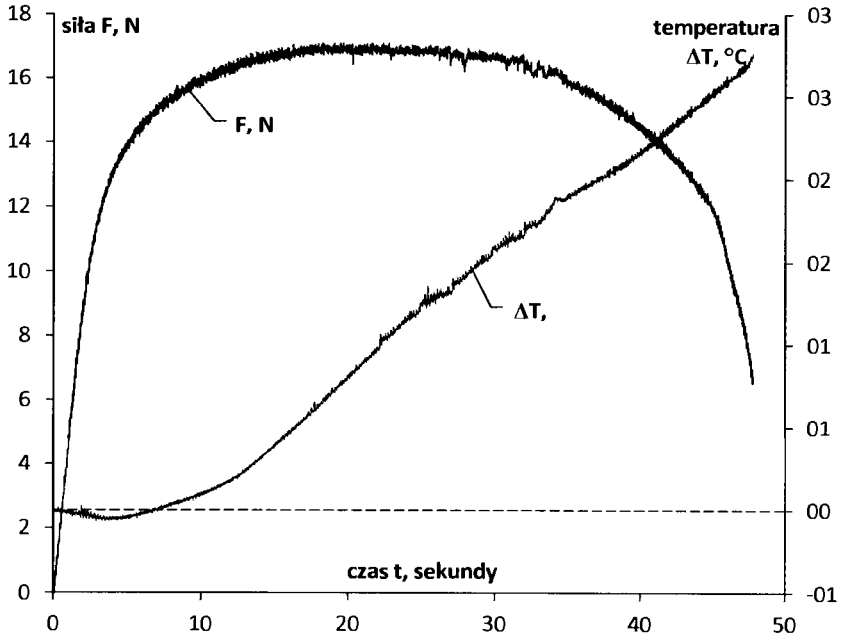
Rys. 1. Wymiary minipróbek zastosowanych w badaniach (grubość 0,2 mm) (a) oraz przykładowy termogram minipróbki po badaniu monotonicznym (b)

W badaniach zastosowano – opracowany w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn UTP w Bydgoszczy w ramach projektu badawczego rozwojowego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – system MFS do badań własności mechanicznych mikroelementów. W trakcie badań za pomocą kamery termograficznej CEDIP Silver 420 wyposażonej w obiektyw mikroskopowy G3 (pole widzenia ok. 3,2 mm x 2,6 mm – wielkość piksela obrazu ok. 0,01 mm x 0,01 mm) z częstotliwością 100 Hz prowadzono ciągły polowy pomiar temperatury minipróbki.

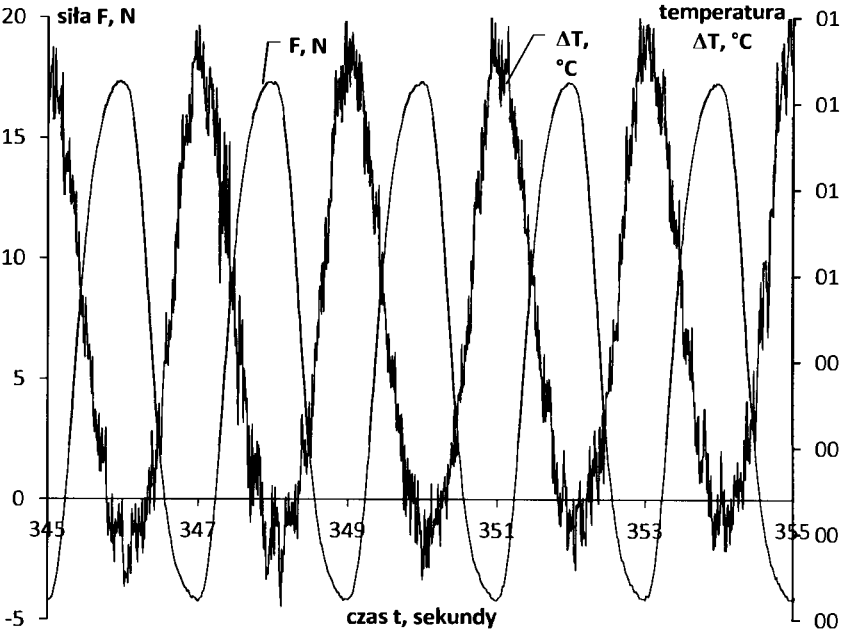
Na rysunku 2a przedstawiono przykładowe wykresy zmiany siły rozciągającej oraz średniej temperatury części pomiarowej minipróbki w funkcji czasu zarejestrowane podczas próby monotonicznego rozciągania. W porównaniu z przebiegami rejestrowanymi dla próbek o standardowych rozmiarach nie stwierdzono w chwili rozdzielenia próbki w wyniku rozerwania znaczącego skoku temperatury, co wiązać należy z małymi rozmiarami minipróbki, a w konsekwencji ze zdecydowanie mniejszą energią uwalnianą w momencie zerwania.

Na rysunku 2b zamieszczono fragment przebiegu siły obciążającej oraz temperatury minipróbki w funkcji czasu podczas obciążenia zmiennego. Cyklicznej zmianie siły obciążającej minipróbkę o amplitudzie 8,7 N towarzyszyła cykliczna zmiana temperatury o amplitudzie ok. 0,33°C oraz stopniowo narastającej wartości średniej temperatury, która nie uległa ustaleniu, aż do momentu pęknięcia próbki.

a)



b)



Rys. 2. Przykładowy wykres zmiany siły oraz temperatury minipróbki w funkcji czasu podczas próby monotonicznego rozciągania (a) oraz fragment zarejestrowanych cyklicznych zmian siły obciążającej oraz temperatury minipróbki w funkcji czasu podczas obciążenia zmiennego (b)

Adam LIPSKI, Dariusz SKIBICKI

ZMIANA TEMPERATURY PRÓBKI W ZALEŻNOŚCI OD CHARAKTERU OBCIĄŻENIA WIELOOSIOWEGO

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

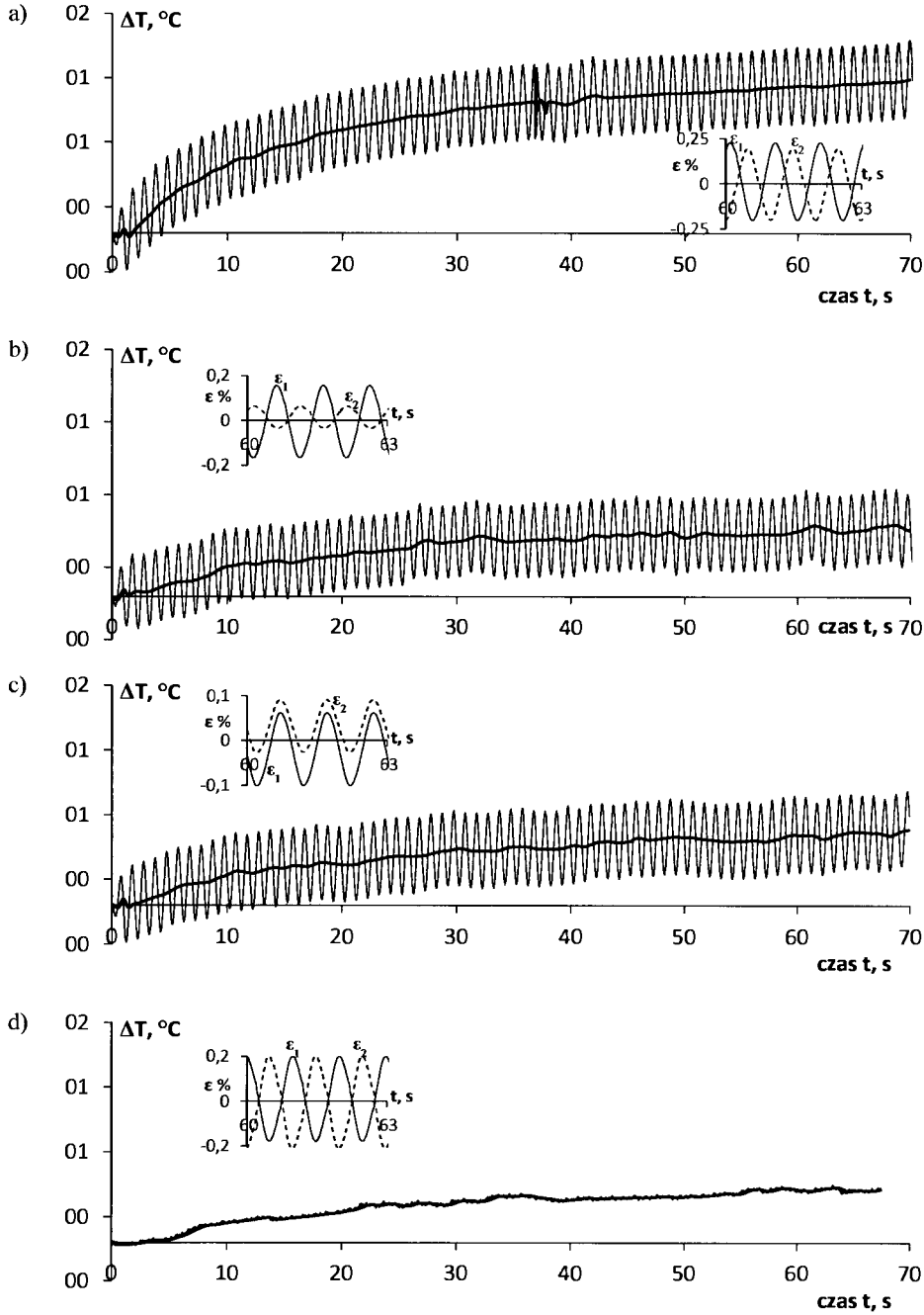
W pracy przedstawiono wyniki badań wstępnych dotyczących zmiany temperatury próbek walcowych o średnicy 6 mm wykonanych ze stali X2CrNiMo17-12-2 poddanych obciążeniom zmiennym w zależności od charakteru tych obciążeń: nieproporcjonalnego ($\tau_a/\sigma_a = 0{,}865$ oraz $\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ i $\varphi = 90°$) oraz proporcjonalnego ($\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ i $\varphi = 0°$), rozciągania-ściskania oraz skręcania. Badania przeprowadzono dla czterech poziomów naprężenia ekwiwalentnego $\sigma_{eq} = 300$, 310, 320 i 330 MPa z częstotliwością obciążenia wynoszącą 1 Hz na wieloosiowej hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8874 przy sterowaniu siłą osiową i momentem skręcającym. Podstawowe parametry obciążenia przyjęte w badaniach zamieszczono w tabeli 1.

W trakcie badań mierzono metodą tensometryczną odkształcenia próbki w trzech kierunkach. Ponadto za pomocą kamery termograficznej CEDIP Silver 420 z częstotliwością 50 Hz prowadzono ciągły polowy pomiar temperatury próbki.

Na rysunku 1 przedstawiono wykresy zmiany średniej temperatury próbki w części pomiarowej dla wybranych przypadków obciążenia: nieproporcjonalnego (rys. 1a), proporcjonalnego (rys. 1b), rozciągania-ściskania (rys. 1c) oraz skręcania (rys. 1d). Przeprowadzona analiza amplitudy i wartości średniej temperatury zarejestrowanej podczas badań wskazuje, że temperatura istotnie zależy od charakteru obciążenia próbki. Największą zmianę wartości średniej temperatury w czasie stwierdzono dla obciążenia nieproporcjonalnego, dla którego po ok. 60 sekundach trwania obciążenia wynosiła ok. 1,15°C. W przypadku obciążenia proporcjonalnego wartość średnia ustaliła się na poziomie ok. 0,48°C, dla rozciągania-ściskania – ok. 0,55°C, dla skręcania – ok. 0,40°C. Ponadto stwierdzono, że charakter zmiany wartości średniej temperatury zgodny jest z charakterem zmiany największego odkształcenia głównego. W przypadku amplitudy temperatury największą wartość zarejestrowano dla obciążenia nieproporcjonalnego. W przypadku skręcania zarejestrowana amplituda zmian temperatury była pomijalnie mała.

Tabela 1. Podstawowe parametry obciążenia przyjęte w badaniach dla poziomu naprężenia ekwiwalentnego $\sigma_{eq} = 330$ MPa

Charakter obciążenia	σ_{eq}	σ_a	τ_a	φ
	MPa	MPa	MPa	°
nieproporcjonalne 0,8	330	330,0	272,6	90
nieproporcjonalne 0,5		330,0	165,0	90
proporcjonalne 0,5		282,5	141,2	0
rozciąganie-ściskanie		330,0	0,0	0
skręcanie		0	273,1	0



Rys. 1. Przykładowe wykresy zmiany temperatury próbki podczas pierwszych 70 sekund trwania obciążenia zmiennego dla poziomu naprężenia ekwiwalentnego σ_{eq} = 330 MPa: dla obciążenia nieproporcjonalnego 0,8 (a), dla obciążenia proporcjonalnego 0,5 (b), rozciągania-ściskania (c) oraz skręcania (d)

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

**Tomasz MARCINIAK*, Sławomir BUJNOWSKI*,
Zbigniew LUTOWSKI*, Tomasz GIESKO**, Dariusz BOROŃSKI*****

ZASTOSOWANIE CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU W ANALIZIE ZMĘCZENIOWEGO PĘKANIA

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji i Elektrotechniki,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz
** Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom
*** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Możliwość zastosowania metod cyfrowej korelacji obrazu w analizie odkształceń jest od wielu lat niezwykle atrakcyjną propozycją w mechanice eksperymentalnej ciała stałego [1]. Jednak ze względu na techniczne ograniczenia, jej praktyczne zastosowanie nie jest ciągle satysfakcjonujące, szczególnie w analizie małych wartości odkształceń, typowych dla eksploatacyjnych obciążeń struktur i materiałów o dużej sztywności, np. stali. Pomiar małych przemieszczeń, na podstawie których wyznaczane są w dalszej kolejności odkształcenia, wymaga bowiem stosowania kamer cyfrowych o bardzo dużych rozdzielczościach, a to wiąże się z koniecznością transmisji i obróbki bardzo dużej ilości danych w krótkim czasie. Zastosowanie metod wyznaczania odkształceń opartych na analizie obrazu powierzchni obiektu jeszcze bardziej komplikuje się w przypadku obciążeń zmiennych w czasie. Długotrwałe cykliczne obciążenia, obok znacznego przyrostu liczby danych do obróbki i dalszego skrócenia czasu analizy, powodują także dużo większe prawdopodobieństwo dekorelacji metody.

Pomimo tych niedogodności, długoletnie doświadczenia autorów pracy w zakresie badań zmęczeniowych oraz metod eksperymentalnych wskazują na liczne obszary zastosowań metody, szczególnie tam, gdzie inne techniki pomiarowe, w tym metody polowe, nie mogą być zastosowane, np. z powodu braku bezpośredniego dostępu do obiektu lub z powodu jego niewielkich wymiarów uniemożliwiających mocowanie czujników pomiarowych, np. tensometrów [2]. W efekcie podjęto tematykę zastosowania metody cyfrowej korelacji obrazu w pomiarze przemieszczeń i odkształceń w warunkach obciążeń zmiennych w czasie z zastosowaniem współczesnych rozwiązań optoelektronicznych oraz informatycznych.

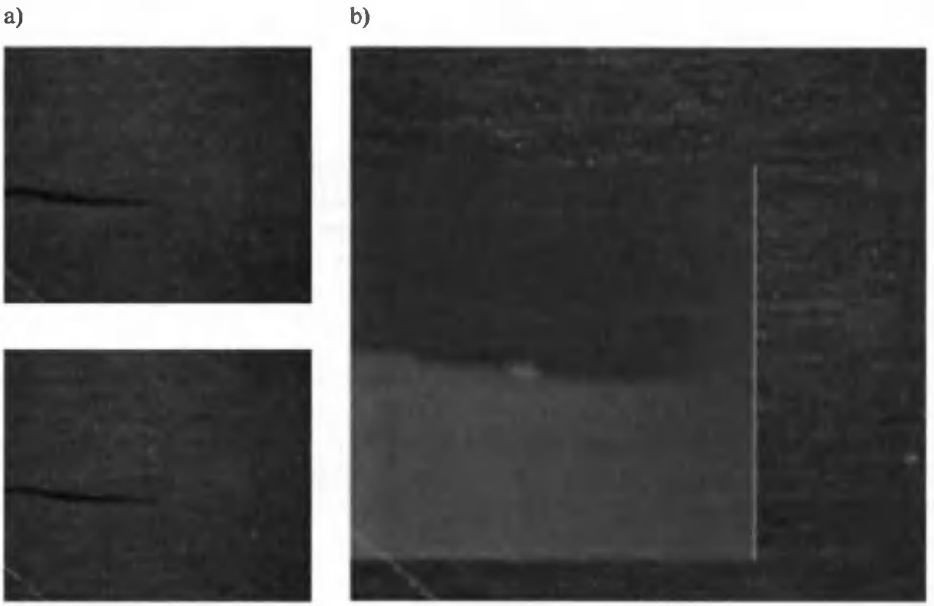
2. ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ W STREFIE PĘKNIĘCIA METODĄ CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU

Podstawowymi założeniami dla prezentowanej w pracy metody pomiaru odkształceń w warunkach obciążeń zmiennych w czasie było uzyskanie wysokiej czułości pomiarowej przy jednoczesnej minimalizacji czasu pomiaru. W tym celu opracowano oryginalne procedury obliczeniowe bazującej na zastosowaniu wieloprocesorowych kart graficznych (GPU). Zastosowanie opracowanej procedury cyfrowej korelacji obrazów przedstawiono na przykładzie analizy odkształceń w metodzie badania przebiegu zmęczeniowego pękania w lotniczych złączach nitowanych. W prezentowanym przykładzie

badań stosowano próbkę z otworem pod nit wykonaną ze stopu aluminium 2024-T3, którą podczas badań poddawano stałej amplitudzie naprężenia nominalnego i współczynniku asymetrii cyklu R = 0.

Do rejestracji obrazu próbki zastosowano cyfrową kamerę o rozdzielczości 2448x2050 pikseli z obiektywem o polu widzenia 50 mm. Obraz powierzchni próbki przechwytywano do pamięci komputera PC wyposażonego w kartę GPU NVIDIA GTX480 za pomocą karty GigaEthernetowej z maksymalną częstością 17 Hz. Dla zastosowanej rozdzielczości kamery, wymiaru matrycy i powiększenia obiektywu uzyskano czułość pomiarową s = 0,0025 mm.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe obrazy próbki (rys. 1a) w wybranych fazach realizacji cyklu obciążenia zmiennego w czasie oraz wyznaczony na ich podstawie rozkład przemieszczeń w otoczeniu pęknięcia pokazany na tle obrazu próbki (rys. 1b).



Rys. 1. Obrazy próbki w wybranych fazach realizacji cyklu obciążenia (a) oraz wyznaczony na ich podstawie rozkład przemieszczeń w otoczeniu pęknięcia (b)

Szersze omówienie wyników badań przedstawione zostanie podczas obrad XXIV Sympozjonu Zmęczenia i Mechaniki Pękania.

LITERATURA

[1] Lagattu F., Brillaud J., Lafarie-Frenot M.-C., 2004. High strain gradient measurements by using digital image correlation technique. Materials Characterization 53,17-28.

[2] Boroński D., 2007. Metody badań odkształceń i naprężeń w zmęczeniu materiałów i konstrukcji. Wyd. ITE – PIB Bydgoszcz-Radom.

Tomasz MARCINIAK*, Zbigniew LUTOWSKI*, Sławomir BUJNOWSKI*, Dariusz BOROŃSKI, Piotr CZAJKA*****

EKSPERYMENTALNY SYSTEM DO BADAŃ PĘKNIĘĆ PODPOWIERZCHNIOWYCH WYKORZYSTUJĄCY DWA TORY WIZYJNE, ŚWIATŁA WIDZIALNEGO I PODCZERWIENI

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji i Elektrotechniki, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
*** Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

1. WSTĘP

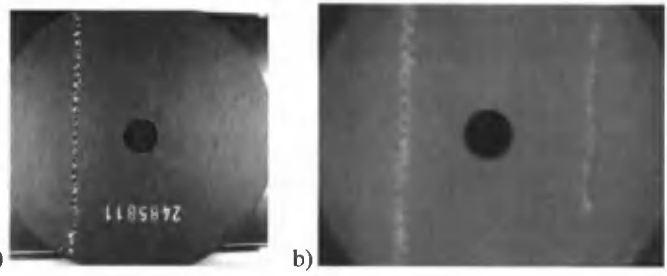
Szybki rozwój optoelektroniki przyczynił się do coraz szerszego wykorzystania optycznych metod pomiarowych i szybkiego rozwoju dziedziny maszynowego widzenia (ang. machine vision) [1]. W podstawowych metodach tego typu stosuje się zakres widzialny światła. Nie wszystkie defekty występujące w elementach konstrukcyjnych, takie jak np. pęknięcia i niejednorodności struktury da się zauważyć w paśmie widzialnym. Z tego powodu często systemy te uzupełnia się o tor wizyjny pracujący w podczerwieni. Dzięki temu możliwe jest monitorowanie temperatury obiektów, wykrywanie obszarów lokalnych różnic temperatury, stref kumulacji ciepła, a także przy zastosowaniu termografii aktywnej wykrywanie defektów w warstwie przypowierzchniowej [2]. Tego typu możliwości są szczególnie atrakcyjne ze względu na metodę metod oceny stanu uszkodzenia zmęczeniowego. Praca z dwoma torami wizyjnymi powoduje jednak powstanie dodatkowych problemów, do których należy transformacja jednego obrazu w drugi.

2. MODEL STANOWISKA I PRZYKŁADY OBSERWACJI

Podstawowe funkcje eksperymentalnego systemu inspekcji opartego na dwóch torach wizyjnych:

- wykrywanie i identyfikacja wad struktur powierzchniowych wyrobów w paśmie widzialnym;
- analiza emisji cieplnej z powierzchni wyrobu umożliwiająca wykrywanie defektów powierzchniowych i podpowierzchniowych oraz obszarów kumulacji ciepła.

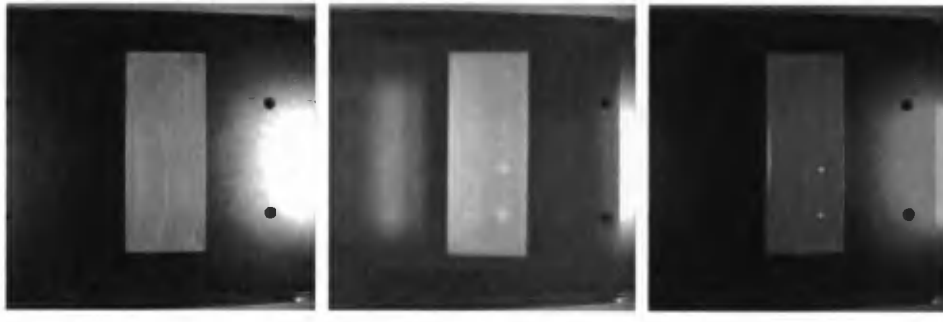
Daje to możliwość identyfikowania, przy wykorzystaniu termografii pasywnej i aktywnej, różnego rodzaju wad, do których należą pęknięcia powierzchniowe, złuszczenie, ubytki materiału powierzchniowe i podpowierzchniowe, wady obróbki mechanicznej, odbarwienie powłoki, obszary podwyższonej temperatury. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe obrazy wadliwej tarczy uzyskane w paśmie widzialnym i podczerwieni przy termografii aktywnej, która ujawniła niewidoczne w paśmie widzialnym pęknięcia.



a) b)

Rys. 1. Oraz wadliwej tarczy (a) w paśmie widzialnym, (b) w podczerwieni

Większe możliwości przy identyfikacji wad można uzyskać po nałożeniu obrazów z obu pasm na siebie. W tym celu w stanowisku badawczym zastosowano zaawansowane metody obróbki obrazów prowadzące do wykonania przekształcenia homomorficznego, dzięki któremu możliwe jest dopasowanie obrazów, widzianych z różnych punktów przestrzeni i o różnych rozdzielczościach.



a) b) c)

Rys. 2. Obraz detalu z wadą podpowierzchniową: a) w paśmie widzialnym, b) w podczerwieni, c) w paśmie widzialnym z zaznaczoną wadą po pasowaniu obrazów

3. WNIOSKI

Wykonane stanowisko badawcze i przeprowadzone na nim eksperymenty pozwalają stwierdzić że zastosowanie drugiego toru wizyjnego w paśmie podczerwonym jest uzasadnione i pozwala na wykrycie wad podpowierzchniowych materiału. Skuteczność wykrywania tych wad zależy od rodzaju materiału i głębokości występowania wady. Wymaga to jednak bardziej złożonych algorytmów obróbki obrazów, a co za tym idzie komputerów o większych mocach obliczeniowych.

LITERATURA

[1] Marciniak T., Boroński D., Lutowski Z., Bujnowski S., Giesko T., 2010. Digital Image correlation – universal tools versus custom solutions 4, Wyd. Nauk. ITeE-PIB, Radom, 19-28.
[2] Minkina W., Dudzik S., 2009. Infrared thermography – errors and uncertainties. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Ewa MARCISZ, Adam NIESŁONY, Tadeusz ŁAGODA

KONCEPCJA WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH DLA MATERIAŁÓW Z UMOCNIENIEM

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WPROWADZENIE

W pracy wykorzystano wyniki badań zaczerpnięte ze źródeł literaturowych [1] dotyczących stali wysokostopowej X6NiCr3220, na podstawie których wyznaczono charakterystyki zmęczeniowe. W celu opisu charakterystyk zmęczeniowych korzysta się z równania Mansona-Cofina-Basquina

$$\varepsilon_{at} = \frac{\sigma'_f}{E}\left(2N_f\right)^b + \varepsilon'_f\left(2N_f\right)^c \tag{1}$$

Powyższe równanie opisuje krzywą odkształceniowego wykresu zmęczeniowego, z którego można wyróżnić dwie części: pierwszą – odpowiadającą za amplitudę odkształceń sprężystych oraz drugą – odpowiadającą za amplitudę odkształceń plastycznych.

Do obliczeń zmęczeniowych często wykorzystuje się także równanie Rambergа-Osgoda:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \tag{2}$$

Równanie to można również rozdzielić na część przypisaną amplitudzie odkształcenia sprężystego i część przypisaną amplitudzie odkształcenia plastycznego [2, 3].

Przedstawione równania umożliwiają zamodelowanie pętli histerezy, dzięki której uwidacznia się część należąca do amplitudy odkształcenia liniowo-sprężystego oraz amplitudy odkształcenia plastycznego. Celem niniejszej pracy jest zdefiniowanie i opisanie części trzeciej zaobserwowanej dzięki przeprowadzonym analizom.

2. PODZIAŁ AMPLITUDY ODKSZTAŁCENIA CAŁKOWITEGO

W celu przeprowadzenia analizy wykorzystano dane literaturowe dla stali wysokostopowej X6CrNi3220 [1]. Do analizowanego materiału zaproponowano nowy opis krzywej cyklicznego odkształcenia. W czasie analizy zauważono także nieliniowy charakter odkształceń sprężystych. Amplitudę odkształcenia całkowitego podzielono na trzy części: liniowo-sprężystą, plastyczną i nieliniowo-sprężystą. W celu zachowania formy dotychczasowych równań dodano do nich trzeci człon odpowiedzialny za odkształcenia nieliniowo-sprężyste. Dla krzywej cyklicznego odkształcenia przyjmuje się:

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{ap} + \varepsilon_{ans} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} + \left(\frac{\sigma_a}{K''}\right)^{\frac{1}{n''}} . \quad (3)$$

W przypadku opisu odkształceniowej krzywej zmęczeniowej:

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{ap} + \varepsilon_{ans} = \frac{\sigma'_f}{E}\left(2N_f\right)^b + \varepsilon'_f\left(2N_f\right)^c + \varepsilon''_f\left(2N_f\right)^d . \quad (4)$$

Otrzymane zależności przedstawiono na wykresach, a wybrane wartości ujęto w tabelach.

3. WNIOSKI

W niniejszej pracy zanalizowano krzywe cyklicznego odkształcenia na przykładzie stali X6NiCr3220, dla której wyznaczono charakterystykę do nowego modelu. Zaobserwowano dla niektórych materiałów nieliniowy charakter odkształceń sprężystych. Amplitudę odkształceń całkowitych przedstawiono w trzech częściach: liniowo-sprężystej, plastycznej oraz nieliniowo-sprężystej. W celu zachowania dotychczasowych form równań Ramberga-Osgooda i Mansona-Coffina-Basquina dopisano do nich człon trzeci odpowiedzialny za odkształcenia nieliniowo-sprężyste. Do przeprowadzenia dalszych analiz konieczne jest wykonanie badań dla różnych materiałów z rejestracją pętli histerezy.

LITERATURA

[1] Bäumel A., Seeger T. 1987. Material Data for Cyclic Loading. Materials Science Monographs 42A (E).
[2] Kocańda S., Kocańda A., 1989. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali. PWN Warszawa.
[3] Kocańda S., Szala J., 1985. Podstawy Obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa.
[4] Niesłony A., El Dsoki Ch., Kaufmann H., Krug P., 2008. New method for ewaluation of the Manson Coffin Basquin and Ramberg Osgood equations with respect to compatibility. International Journal of Fatigue 30, 1967-1977.
[5] Walat K., Łagoda T., Karolczuk A., 2009. Fatigue life according to cyclic strain characteristics determined from variable-amplitude loading. Materials Testing (Materialprufung) 51(5), 286-290.

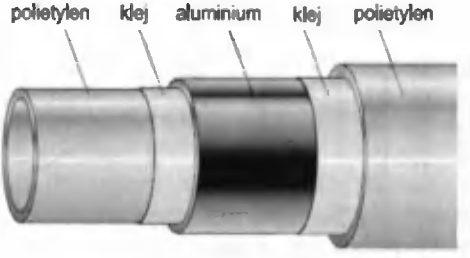
Praca wykonana w ramach projektu badawczego 2011/01/B/ST8/06850 finansowany przez Narodowe Centrum Nauki.

Stanisław MROZIŃSKI, Michał PIOTROWSKI

WPŁYW PRĘDKOŚCI SPAWANIA LASEROWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE POŁĄCZEŃ W RURACH WIELOWARSTWOWYCH

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

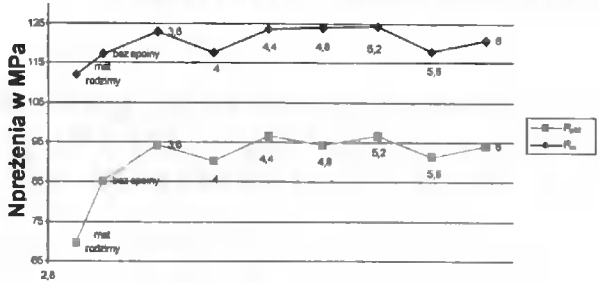
Liczne zalety rur wielowarstwowych, takie jak: odporność na niskie i wysokie temperatury, odporność na zarastanie kamieniem czy zdolność samokompensacji wydłużeń cieplnych sprawiają, że znajdują one coraz szersze zastosowanie. Przykładowe zastosowań rur wielowarstwowych to między innymi instalacje rozprowadzania wody pitnej, wody użytkowej oraz centralnego ogrzewania grzejnikowego i podłogowego. Wielowarstwowa konstrukcja rury składa się z kilku warstw: polietylenu o wysokiej gęstości odpornego na działanie wysokich temperatur, aluminium oraz kleju (rys. 1).



Rys. 1. Budowa rury wielowarstwowej

Rury z tworzyw sztucznych mogą być stosowane w instalacjach grzewczych pod warunkiem posiadania w swojej strukturze warstwy barierowej, zabezpieczającej skutecznie przed dyfuzją tlenu. Zapewniają w ten sposób ochronę stalowych elementów instalacji przed korozją [1]. Barierę taką stanowi najczęściej warstwa aluminium. Ze względu na niewielką grubość warstwy aluminiowej i niezbędną szczelność warstwę aluminium na rurze polietylenowej spawa się najczęściej laserowo. Optymalizacja procesu spawania wymaga doboru odpowiednich parametrów, do których zalicza się prędkość spawania oraz moc wiązki laserowej.

W poniższej pracy poddano ocenie wpływ prędkości spawania laserowego na właściwości wytrzymałościowe oraz zmęczeniowe połączeń spawanych stosowanych w rurach wielowarstwowych. Na rysunku 2 zestawiono wartości podstawowych parametrów wytrzymałościowych określanych podczas próby statycznego rozciągania tj. R_m oraz R_{p02} w zależności od prędkości spawania. Analiza porównawcza wyznaczonych parametrów R_m oraz R_{p02} pozwala stwierdzić, że prędkość spawania ma niewielki wpływ na wymienione parametry.



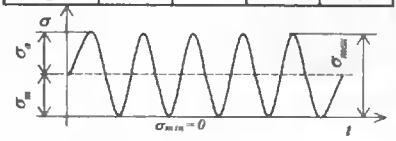
Rys. 2. Wpływ prędkości spawania na parametry wytrzymałościowe

Wpływ prędkości spawania uwidacznia się wyraźnie podczas prób zmęczeniowych. Próby zmęczeniowe przeprowadzono z zastosowaniem próbek wyciętych z warstwy aluminium oplatającej rurę polietylenową (rys. 1). Próbki poddano obciążeniu zmiennemu od zerowo tętniącemu [2]. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3 w postaci wykresów w układzie współrzędnych liczba cykli do pęknięcia N – naprężenie σ_{max}.

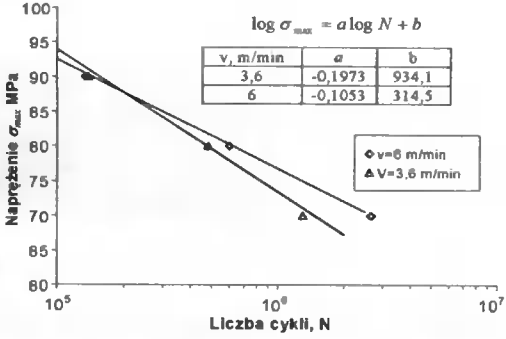
a)

Tabela 1. Parametry obciążenia zmiennego

Poziom	Naprężenie, MPa			
	σ_{max}	σ_{min}	σ_a	$\Delta\sigma_a$
1	70	0	35	70
2	80	0	40	80
3	90	0	45	90



b)



Rys. 3. Wpływ prędkości spawania na trwałość zmęczeniową połączeń spawanych: a) program obciążenia, b) wykresy zmęczeniowe

Na podstawie analizy wykresów zmęczeniowych można stwierdzić, że połączenia spawane uzyskane przy prędkości v = 6 m·min^{-1} mają trwałość zmęczeniową wyższą od trwałości połączeń uzyskanych przy prędkości v = 3,6 m·min^{-1}. Wpływ prędkości na trwałość zależy od poziomu naprężenia σ_{max}. Jest on nieznaczny w obszarze największych realizowanych naprężeń i wzrasta wraz z obniżaniem naprężeń. Z przeprowadzonych badań wynika, że podczas doboru prędkości spawania należy uwzględniać oprócz wyników prób statycznych również wyniki badań zmęczeniowych.

LITERATURA

[1] Rutkiewicz A., 2009. Pomiar szybkości przenikania tlenu przez ścianki rur z tworzyw sztucznych. Prace Instytutu Techniki Budowlanej 2, 23-30.
[2] PN-74/H04327 – Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.

Stanisław MROZIŃSKI, Radosław SKOCKI

WPŁYW TEMPERATURY BADAŃ NA PARAMETRY PĘTLI HISTEREZY

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Mechaniczny,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Problematyka pracy dotyczy analitycznego opisu zmian parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia. Zagadnienie to komplikuje się istotnie, gdy przestaje zależeć jedynie od obciążenia mechanicznego a na jego przebieg zaczyna wpływać, zmienna temperatura [1, 2]. W temperaturach podwyższonych zakres zmian parametrów pętli histerezy najczęściej jest większy niż w temperaturze otoczenia. Celem podstawowym pracy jest określenie wpływu temperatury na zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia.

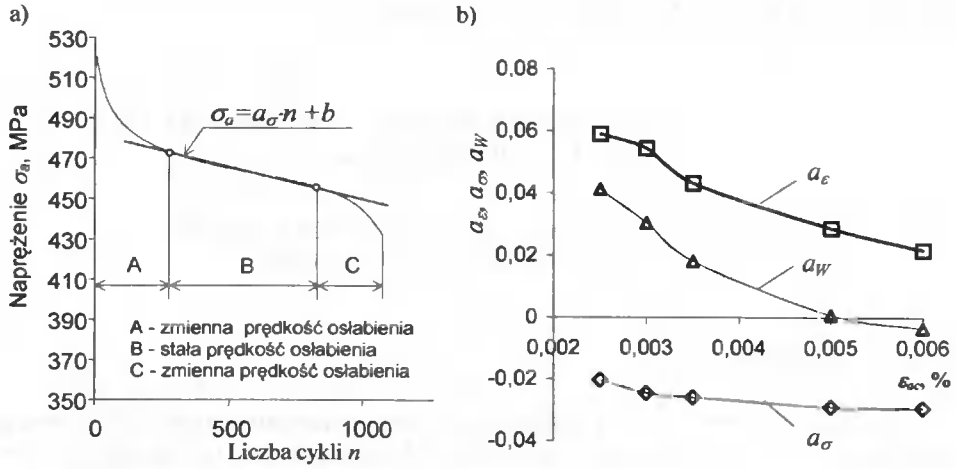
2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań wykonano ze staliwa martenzytycznego GX12CrMoVNbN9 –1. Kształt i wymiary próbek do badań przyjęto zgodnie z normą [3]. Próby zmęczeniowe przeprowadzono na pięciu poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac} = 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,6% w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego (ε_{ac} = const). Badania zmęczeniowe przeprowadzono w temperaturach 25 i 400 i 600°C. Częstotliwość obciążenia f wynosiła 0,2 Hz. Podczas badań rejestrowano wartości chwilowe siły obciążającej oraz odkształcenia próbki dla kolejnych cykli obciążenia.

3. WYNIKI BADAŃ

Przyjęty do badań materiał charakteryzował się niezależnie od temperatury cyklicznym osłabieniem. Do analizy procesu osłabienia badanego staliwa przyjęto trzy charakterystyczne parametry pętli histerezy tj. amplitudę naprężenia σ_a, amplitudę odkształcenia plastycznego ε_{ap} oraz energię odkształcenia plastycznego ΔW_{pl}. Przebieg osłabienia staliwa w trzech temperaturach podzielono na trzy charakterystyczne etapy o różnej prędkości osłabienia (A, B, C). W celu ich omówienia na rysunku na rysunku 1a przedstawiono w sposób schematyczny przebieg zmian amplitudy naprężenia σ_a w funkcji liczby cykli obciążenia dla poziomu odkształcenia ε_{ac} = 0,6% w temperaturze 25°C.

W pracy przyjęto opisywać analitycznie zmiany parametrów pętli histerezy w najdłuższym etapie przebiegu osłabienia staliwa (etap „B" – rys. 1a). Przebieg zmian wybranych parametrów pętli na pięciu poziomach odkształcenia aproksymowano liniami prostymi opisanymi równaniem regresji o postaci przedstawionej na rysunku. Na rysunku 1b zestawiono wartości współczynników kierunkowych prostych regresji a_σ, a_σ, a_σ w zależności od poziomu odkształcenia całkowitego ε_{ac} dla jednego poziomu temperatury (T = 25°C).



Rys. 1. Osłabienie staliwa na poziomie ε_{ac} = 0,6%: a) zmiany σ_a, b) współczynniki kierunkowe prostych regresji opisujących zmiany parametrów pętli histerezy

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że staliwo martenzytyczne jest materiałem, który podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych, niezależnie od temperatury podlega silnemu osłabieniu. Proces osłabienia staliwa występuje na wszystkich realizowanych poziomach odkształcenia. W przebiegu procesu osłabienia staliwa można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy o zróżnicowanej prędkości tego procesu. Niezależnie od poziomu odkształcenia występuje zawsze etap charakteryzujący się stałą prędkością osłabienia (etap B – rysunek 1a). W etapie tym zmiany parametrów pętli histerezy (σ_a, ε_{ap}, ΔW_{pl}) w funkcji liczby cykli obciążenia można aproksymować liniami prostymi. Analiza wartości współczynników kierunkowych a_σ, a_ε, a_W prostych regresji pozwala stwierdzić, że na prędkość osłabienia we wszystkich etapach wpływ mają temperatura oraz poziom odkształcenia. Parametrem pętli histerezy, który jest najmniej czuły na zmiany własności cyklicznych niezależnie od poziomu temperatury i odkształcenia jest energia odkształcenia plastycznego.

LITERATURA

[1] Collins J.A., 1993. Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction, Prevention. John Wiley & Sons, New York.
[2] Kocańda S., Kocańda A., 1989. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali. PWN Warszawa.
[3] ASTM E606-92: Standard Practice for Strain – Controlled Fatigue Testing.

Praca naukowa finansowana ze środków MNiSW na naukę w latach 2011-2013 jako projekt badawczy nr 1215/B/T02/2011/40.

**Stanisław MROZIŃSKI*, Radosław SKOCKI*,
Grzegorz GOLAŃSKI**, Krzysztof WERNER****

WPŁYW TEMPERATURY NA DANE MATERIAŁOWE OKREŚLANE NA PODSTAWIE NISKOCYKLOWYCH BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz
** Politechnika Częstochowska,
ul. Armii Krajowej 19, 42- 200 Częstochowa

1. WPROWADZENIE

Problematyka pracy dotyczy metody obliczeń trwałości zmęczeniowej, w których wykorzystuje się charakterystyki materiałowe określane podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych [1]. Jedną z charakterystyk określanych na podstawie badań zmęczeniowych jest wykres cyklicznego odkształcenia opisujący zależność pomiędzy amplitudą odkształcenia plastycznego ε_{ap} a amplitudą naprężenia σ_a. Podczas opracowywania wyników badań zakłada się, że pomiędzy tymi parametrami z okresu stabilizacji występuje zależność potęgowa. W układzie współrzędnych podwójnie logarytmicznych jest ona opisywana równaniem Morrowa [1] w postaci:

$$\lg \sigma_a = \lg K' + n' \lg \varepsilon_{ap} \tag{1}$$

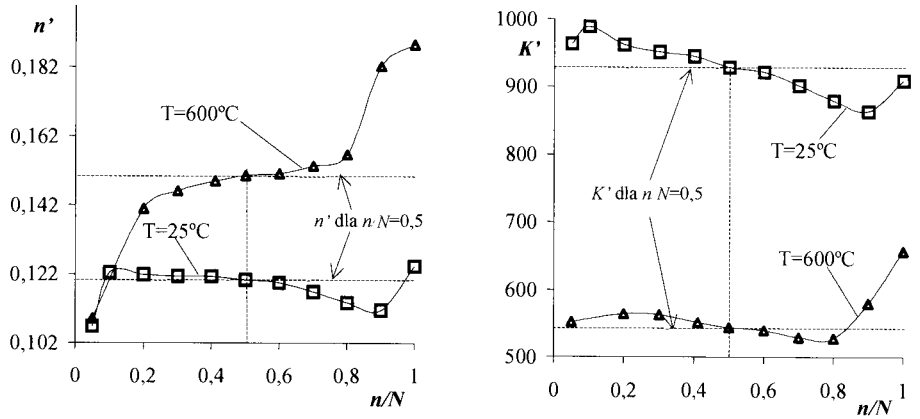
Parametry n' i K' równania (1) to podstawowe dane materiałowe wykorzystywane podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Dla materiałów cyklicznie stabilnych interpretacja fizyczna tych parametrów niebudzi większych wątpliwości. Występują one jednak w przypadku materiałów nie wykazujących okresu stabilizacji [1, 2]. W przypadku takim wartości parametrów n' i K' zależą od okresu trwałości, dla którego zostały określone [2]. Celem pracy jest określenie wpływu temperatury podwyższonej na wielkość zmian danych materiałowych określanych podczas badań zmęczeniowych. Badania prowadzono, porównując wartości danych materiałowych określanych na podstawie badań prowadzonych w różnych temperaturach.

2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań wykonano ze staliwa GX12CrMoVNbN9 –1. Próby zmęczeniowe przeprowadzono na pięciu poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac} = 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,6% w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego (ε_{ac} = const). Badania zmęczeniowe przeprowadzono w temperaturach 25 i 400 i 600°C. Częstotliwość obciążenia f wynosiła 0,2Hz. Podczas badań rejestrowano wartości chwilowe siły obciążającej oraz odkształcenia próbki dla kolejnych cykli obciążenia.

3. WYNIKI BADAŃ

Zgodnie z oczekiwaniami podwyższona temperatura powodowała obniżenie trwałości zmęczeniowej. Wpływ temperatury na trwałość zależy od poziomu odkształcenia. Jest niewielki w obszarze największych poziomów odkształcenia i wzrasta wraz z jego obniżaniem. Przyjęty do badań materiał charakteryzował się niezależnie od temperatury cyklicznym osłabieniem. Na podstawie przeprowadzonych badań określono wartości parametrów n' oraz K'. Parametry te wyznaczono zgodnie z metodyką zaproponowaną w pracy [2]. Przykładowe wyniki opracowania wyników badań prowadzonych w temperaturze 25 i 600°C na rysunku 1.



Rys. 1. Wyniki opracowania badań zmęczeniowych: a) T=25°C, b) T=600°C

Na podstawie uzyskanych wykresów można stwierdzić, że wartości parametrów n' i K' podlegają zmianom i zależą od okresu trwałości n/N. Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że wartości parametrów n' i K' wyznaczone w połowie trwałości (n/N = 0,5) nie są wartościami średnimi dla całego obszaru trwałości. Analiza porównawcza uzyskanych wyników wskazuje na skalę dokonywanego uproszczenia poprzez przyjęcie jako wyników opracowania wartości parametrów n' i K' z jednego okresu trwałości zmęczeniowej n/N = 0,5.

LITERATURA

[1] Mroziński S., 2008. Stabilizacja własności cyklicznych metali i jej wpływ na trwałość zmęczeniową. Rozprawy 128. Wyd. Uczeln. Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.

[2] Mroziński S., Lipski A., 2012. Method of low-cycle fatigue test results processing. Physico-chemical Mechanics of Materials 1, 79-83.

Praca naukowa finansowana ze środków MNiSW na naukę w latach 2011-2013 jako projekt badawczy nr 1215/B/T02/2011/40.

Stanisław MROZIŃSKI, Sławomir WŁODARCZYK

BADANIE STALIWA W WARUNKACH ZMĘCZENIA CIEPLNO-MECHANICZNEGO

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Mechaniczny,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

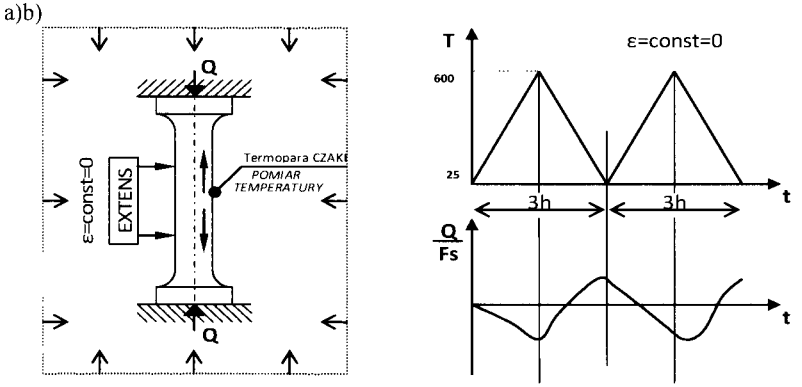
1. WPROWADZENIE

Zmiany temperatury eksploatacji wielu urządzeń mogą powodować powstanie zmiennych naprężeń, które mogą prowadzić do tzw. zmęczenia cieplnego. Efekt powstawania naprężeń cieplnych pojawia się, gdy w warunkach eksploatacji dochodzi do hamowania odkształceń elementu na skutek wzrostu temperatury [2].

Celem badań opisanych w poniższej pracy była doświadczalna weryfikacja metodyki prowadzenia badań eksperymentalnych dotyczących zmęczenia cieplnego na maszynie wytrzymałościowej.

2. OPIS BADAŃ

Podczas badań weryfikacyjnych wykorzystywano staliwo martenzytyczne GX12CrMoVNbN9 –1. Próbki do badań przygotowano zgodnie z normą [1]. Podczas badań przeprowadzono próby statyczne w warunkach obciążenia mechanicznego oraz próby cykliczne w warunkach obciążenia cieplnego. Temperaturę próbki zmieniano zgodnie z programem pokazanym na rysunku 1.

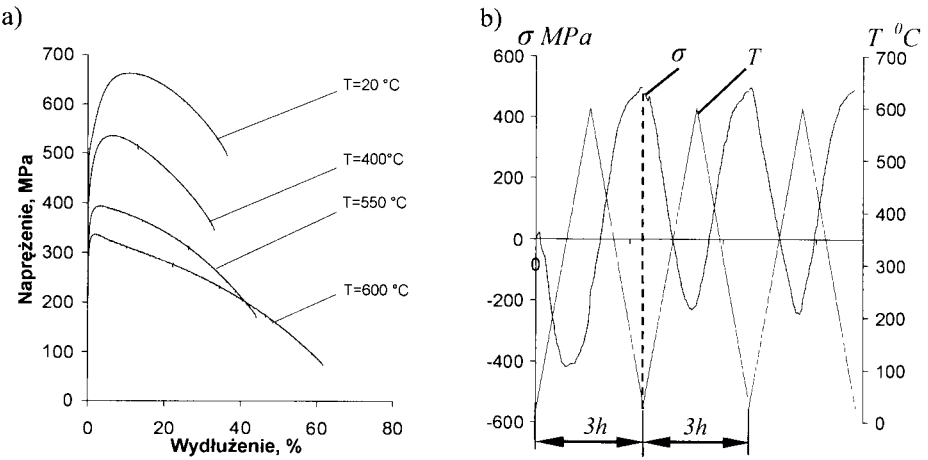


Rys. 1. Badania zmęczenia cieplnego: a) układ pomiarowy, b) program zmian temperatury

Wielkościami rejestrowanymi podczas obciążeń cieplnych (nagrzewanie i chłodzenie komory) była siła obciążająca próbkę oraz jej temperatura. Parametrem, który utrzymywano podczas testów na niezmiennym poziomie było odkształcenie próbki ($\varepsilon = \text{const}$). Odkształcenie próbki kontrolowano przy wykorzystaniu ekstensometru o bazie pomiarowej 12,5 mm.

3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań w warunkach obciążenia mechanicznego w różnych temperaturach zestawiono w postaci wykresów statycznego rozciągania w układzie współrzędnych naprężenie-wydłużenie. Na rysunku 2a przedstawiono przykładowe wykresy rozciągania uzyskane w czterech temperaturach. Na rysunku 2b zestawiono wyniki badań w warunkach obciążenia cieplnego w formie przykładowych wykresów zmian naprężeń w zależności od czasu $\sigma = f(t)$ oraz temperatury od czasu $T = f(t)$.



Rys. 2. Wyniki badań: a) obciążenia mechaniczne, b) obciążenia cieplne

Na podstawie przeprowadzonych w różnych temperaturach prób statycznego rozciągania można stwierdzić, że podwyższona temperatura powoduje obniżenie podstawowych parametrów wytrzymałościowych staliwa. Wielkość obniżenia zależy od temperatury badań, np. w temperaturze 600°C doraźna wytrzymałość na rozciąganie wynosi tylko około 50% wartości tego parametru w temperaturze otoczenia, granica plastyczności 60%, a moduł Younga 70%.

Odzerowo tętniące zmiany temperatury mogą prowadzić do wystąpienia w materiale naprężeń zmiennych dwustronnych (rozciąganie-ściskanie). Wartość maksymalnych naprężeń zmiennych powstających w staliwie na skutek zmian temperatury może przekraczać granicę plastyczności. Podczas obciążeń cieplnych występuje podobnie jak podczas obciążenia mechanicznego zjawisko cyklicznego osłabienia staliwa.

LITERATURA

[1] ASTM E606-92: Standard Practice for Strain -Controlled Fatigue Testing.
[2] Shankar V., Bauer V., Sandya R., Mathew M.D., Christ H.-J., 2012. Low Cycle fatigue and thermo-mechanical fatigue behavior of modified 9Cr-1Mo ferritic steel at elevated temperatures, Journal of Nuclear Materials 420, 23-30.

Andrzej NEIMITZ

ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE RZECZYWISTYCH OBIEKTÓW KONSTRUKCYJNYCH - MODELE OBLICZENIOWE

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,
Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Podstawowe różnice pomiędzy klasyczną Wytrzymałością Materiałów a Mechaniką Pękania sprowadzają się do dwóch elementów:
- różnych kryteriów zniszczenia,
- kryteria Mechaniki Pękania nie wykorzystują stałych charakteryzujących wyłącznie materiał.

Wielkościami kryterialnymi w klasycznej Wytrzymałości Materiałów są naprężenia lub odkształcenia, lub funkcje stworzone na bazie tych wielkości. Wielkość kryterialną porównuje się z cechą materiału lub jej funkcją. Mogą to być, np. granica plastyczności lub wytrzymałość doraźna. Klasyczne rozwiązania Mechaniki Pękania oparte na założeniach ostrego wierzchołka szczeliny lub karbu oraz małych odkształceń w liniowych i nieliniowych materiałach prowadzą do osobliwych naprężeń i odkształceń. Jedynym wyjątkiem są materiały doskonale plastyczne. Osobliwość naprężeń sprawia, że wielkościami kryterialnymi stają się amplitudy osobliwości (współczynnik intensywności naprężeń, całka J) lub funkcje zbudowane na podstawie tych wielkości. Często te kryterialne wielkości nazywane są uogólnionymi siłami działającymi na wierzchołek szczeliny, choć jednostki którymi są definiowane nie są jednostkami siły. Uogólnione siły zależą od zewnętrznych obciążeń, wielkości szczelin oraz wielkości i kształtu elementu konstrukcyjnego. Uogólnionym siłom przeciwstawiają się siły reprezentujące, opór jaki stawia materiał propagującej lub zamierzającej propagować szczelinie. Opór ten nazywamy odpornością na pękanie.

Odporność na pękanie w klasycznych kryteriach Mechaniki Pękania oznaczamy jako K_C, J_C, G_C, δ_{TC}: kolejno krytyczny współczynnik intensywności naprężeń, krytyczna wartość całki J, krytyczna wartość współczynnika uwalniania energii, krytyczna wartość rozwarcia wierzchołkowego pęknięcia. Jeśli przed indeksem C lub T pojawi się symbol I, np. K_{IC}, oznacza to, że krytyczna wartość została zmierzona zgodnie z odpowiednimi normami, np. [1-3], co jest jednoznaczne ze stwierdzeniem, że otrzymana została ona w warunkach dominacji płaskiego stanu odkształceń przed wierzchołkiem szczeliny. Wszystkie wartości odporności na pękanie mierzone w warunkach dominacji czy to płaskiego stanu odkształceń naprężeń, czy to płaskiego stanu naprężeń lub w stanie 3D zależą od materiału, wielkości oraz kształtu elementu. W żadnych warunkach nie są stałymi materiałowymi. Przy dominacji płaskiego stanu odkształcenia zależność odporności na pękanie od grubości materiału nie jest silna, np. $K_{IC} \sim \left(\frac{B}{B_{ref}}\right)^{0,25}$. Dla grubości mniejszej niż krytyczna: $B < 2,5\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0}\right)^2$, odporność na pękanie bardzo silnie zależy od grubości elementu. Odporność na pękanie bardzo silnie zależy od długości pęknięcia, jeśli jest ona mniejsza niż 45% szerokości elementu. Wartości odporności na pękanie wyznaczone wg norm są w grupie najniższych wartości uzyskanych spośród

próbek o mniejszych grubościach i długościach szczelin niż wymagane przez normy. Wstawiając te wartości do kryterium pękania, uzyskano rezultat konserwatywny, bezpieczny przy ocenie wytrzymałości konstrukcji.

W zakresie tzw. lokalnej mechaniki pękania, którą zapoczątkował Novozhilov [4], będąc ciągle w obszarze osobliwych naprężeń oraz Ritchie, Knot and Rice [5] (RKR) dla naprężeń skończonych wynikających z przyjęcia do analizy skończonych odkształceń. W tym przypadku, naprężenia posiadają w pewnej małej odległości od wierzchołka szczeliny maksimum, którego wartość zależy od cech plastycznych materiału oraz od cech geometrycznych elementu konstrukcyjnego. Hipoteza RKR była wielokrotnie z sukcesem stosowana, początkowo przez szkołę francuską [5-7], potem przez grupę R. Doddsa [8-10] oraz innych [11-14]. Kryteria pękania w zakresie lokalnej teorii oparte są zwykle na co najmniej dwóch wielkościach kryterialnych. Są to naprężenie i jakiś parametr skali związany z obszarem tuż przed wierzchołkiem szczeliny. W przypadku kryteriów lokalnej mechaniki pękania pojawiają się wielkości, które uznawane są za stałe materiałowe. Może to być, np. krytyczne naprężenie, które wg jednych teorii nie zależy od temperatury [5, 6], wg innych zależy [13]. Może to być tzw. krytyczna długość lub krytyczna odległość, która na ogół jest uznawana za stałą materiałową. Stan naprężeń przed wierzchołkiem szczeliny wg teorii lokalnych zależy od parametrów geometrycznych elementu konstrukcyjnego, dlatego również i moment krytyczny od tych parametrów zależy. Tym niemniej lokalne teorie pozwalają na ustalenie związków pomiędzy krytycznymi wielkościami takimi jak K_C a K_{IC} a parametrami geometrycznymi elementu konstrukcyjnego. W pracy przedstawionych zostanie kilka możliwych metod oceny rzeczywistej odporności na pękanie, będącej cechą elementu konstrukcyjnego. Zaproponowane zostaną modele, które mają swe źródła w klasycznej Mechanice Pękania, jak również modele opierające się na obliczeniach numerycznych, charakterystyczne dla Lokalnej Mechaniki Pękania. Te drugie, wykorzystujące odpowiednie hipotezy, zapisane zostaną w formie analitycznej. Rozważane będą tzw. więzy płaskie (*in-plane-constraint)*– wpływ długości szczeliny – oraz więzy w kierunku grubości (*out-of-plane-constraint*).

Wykaz literatury, podany w kolejności tak jak we wstępie powyżej, pojawi się w pełnej wersji referatu na konferencji.

Adam NIESŁONY, Michał BÖHM

WYZNACZANIE TRWAŁOŚCI NA POSTAWIE EKSPERYMENTALNYCH WYKRESÓW ZMĘCZENIOWYCH PRZY OBCIĄŻENIU STAŁO-AMPLITUDOWYM Z WARTOŚCIĄ ŚREDNIĄ

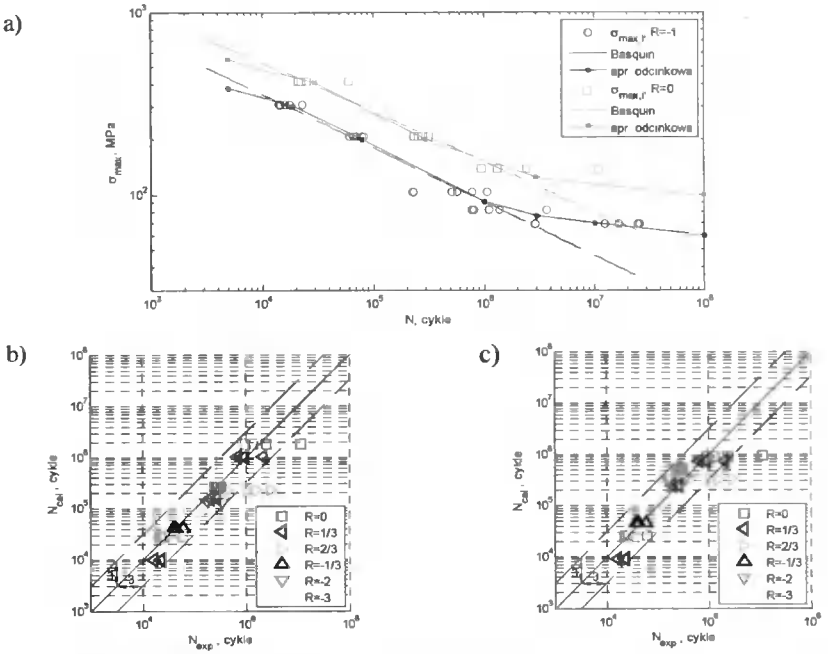
Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. S. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WPROWADZENIE

Zmęczenie mechaniczne materiału jest procesem wynikającym ze zmiennego w czasie obciążenia i przejawia się utratą spójności materiału i jego zdolności do przenoszenia obciążeń. Mechanizm tego zjawiska jest złożony i zależy głównie od rodzaju materiału, charakteru zmian obciążenia, stanu powierzchni i kształtu elementu. W praktyce inżynierskiej zjawisko to opisuje się wykresami zmęczeniowymi, które są wynikiem obróbki statystycznej wyników badań próbek materiału przy ściśle ustalonych warunkach obciążenia zmiennego. Otrzymuje się w ten sposób informacje wystarczające do prawidłowego opisu zjawiska bez wnikania w mechanizmy makroskopowe zmęczenia, które są trudne do opisania w sposób deterministyczny. W tym celu najczęściej wykorzystuje się naprężeniowe wykresy zmęczeniowe, które wiążą liczbę cykli do zniszczenia z amplitudą naprężenia. Modeluje się te wykresy funkcjami wykładniczymi, uzyskując odpowiednie odcinki proste na wykresach o osiach logarytmicznych. Jednym z najbardziej popularnych wykresów tego typu są wykresy Wöhlera i Basquina. Niestety, opisują one prawidłowo rzeczywisty wykres tyko dla wąskiego przedziału liczby cykli, w którym obserwuje się w przybliżeniu odcinek prosty [1, 2]. Dlatego też w pracy podjęto próbę opisu wyników eksperymentalnych [3] wykresami zmęczeniowymi dla $R = -1$ i $R = 0$ metodą odcinkową. (rys. 1a), a następnie wykorzystano tak sporządzone wykresy do obliczenia trwałości zmęczeniowej przy uwzględnieniu wpływu wartości średniej obciążenia. Porównanie obliczonej liczby cykli z uzyskanymi podczas eksperymentu przedstawiono na wykresach (rys. 1b i c).

2. WYZNACZANIE TRWAŁOŚCI NA PODSTAWIE WYKRESÓW Σ_A-N Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU NAPRĘŻEŃ ŚREDNICH

Niezawodne prognozowanie trwałości zmęczeniowej jest nieodzownie związane z uwzględnieniem wartości średniej obciążenia na trwałość. Mnogość kombinacji amplitudy obciążenia i wartości średniej spotykana w rzeczywistych przebiegach jest główną przyczyną rozwoju modeli opisujących ten wpływ w sposób analityczny. Różnorodne równania powstałe na przestrzeni lat przedstawiają trwałość zmęczeniową w funkcji amplitudy, wartości średniej i wybranych stałych materiałowych. Jako przykład można podać modele proponowane przez Gerbera [4], Goodmana [1, 2], Soderberga [5], Niesłonego [2] i popularny model SWT [1]. Na szczególną uwagę zasługują dwa ostatnie, które uwzględniają zmianę wrażliwości materiału na wartość średnią od liczby cykli do zniszczenia.



Rys. 1. Naprężeniowe wykresy zmęczeniowe na podstawie badań Kihla i Sarkaniego (a), porównanie trwałości obliczeniowej na podstawie modelu Niesłonego (b) i SWT (c) z eksperymentalną dla różnych wartości współczynnika asymetrii cyklu.

3. SPOSTRZEŻENIA KOŃCOWE ORAZ WNIOSKI

Zastosowanie eksperymentalnych wykresów zmęczeniowych w procesie prognozowania trwałości zmęczeniowej znacząco wpłynęło na dokładność otrzymanych wyników obliczeniowych. Najlepsze wyniki otrzymano stosując parametr SWT oraz model zaproponowany przez Niesłonego. Istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych weryfikacji wybranych modeli na podstawie wykresów zmęczeniowych aproksymowanych odcinkami by wykazać ich przydatność w prognozowaniu trwałości zmęczeniowej w szerokim zakresie liczby cykli.

LITERATURA

[1] Dowling N., 2004. Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue. Society of Automotive Engineers, 14.

[2] Niesłony A., Böhm M., 2011. Trwałość zmęczeniowa żeliwa GGG40 w warunkach zmienno-amplitudowego rozciągania ze skręcaniem z wartością średnią naprężenia. Modelowanie inżynierskie 41, Gliwice, 299-306.

[3] Kihl, D.P., Sarkani, S., 1999. Mean stress effects in fatigue of welded steel joints. Probabilistic Engineering Mechanics 14, 97-104.

[4] Gerber W., 1874. Bestimmung der zulässigen Spannungen in Eisen Konstruktionen, Z Bayer Arch Ing Ver, 6.

[5] Soderberg C., 1930. Factor of safety and working stress. Trans. ASME 52, APM, 52-2.

Jerzy OKRAJNI, Grzegorz JUNAK

MODEL PROCESU ODKSZTAŁCANIA W WARUNKACH ZMĘCZENIA CIEPLNO-MECHANICZNEGO

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii,
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

1. WSTĘP

Opis przebiegu procesu odkształcania w warunkach oddziaływania równocześnie zmiennej temperatury oraz obciążeń mechanicznych i cieplnych znajduje swoją reprezentację w wielu pracach z zakresu mechaniki ciała stałego. Istnieją opracowania stanowiące próbę uogólnienia opisu zachowania się materiałów w postaci równań konstytutywnych dla złożonych stanów naprężenia, uwzględniających zjawiska reologiczne oraz zależność własności materiałów od temperatury w tym modele Lemaitra i Chabocha [1-3], powszechnie stosowane do opisu właściwości materiałów wykorzystywanych do pracy w podwyższonej temperaturze, lub na przykład model Kichenina i współautorów [3] czy też Figla i Güntera [4]. Praca w sposób naturalny nie pretenduje więc do takiego uogólnienia. Stanowi jedynie na obecnym etapie próbę opisu zachowania się materiału poddanego zmęczeniu cieplno-mechanicznemu przy uwzględnieniu szeregu ograniczeń. Zakłada bowiem, że proces odkształcania zachodzi w stanie ustalonym, że osiągnięcie stanu ustalonego w warunkach zmęczenia niskocyklowego jest równoznaczne z osiągnięciem takiego samego stanu w przypadku zmęczenia cieplno-mechanicznego. Rozważania odniesiono przy tym do jednoosiowego stanu naprężenia, nie uwzględniono również efektów reologicznych.

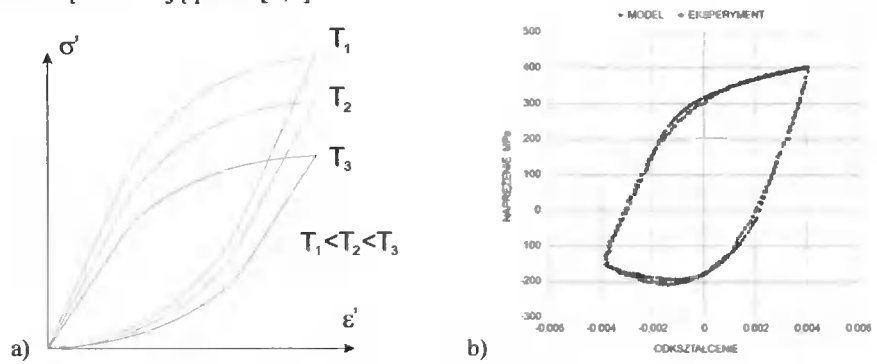
2. OPIS PROPONOWANEJ METODY

Podstawą proponowanej metody opisu mechanicznego zachowania się materiału jest wprowadzenie funkcji $\sigma' = f(\varepsilon', T)$, $\varepsilon' \in (0, \Delta\varepsilon)$ opisującej przebieg ustalonych pętli histerezy, który zależy od temperatury (rys. 1a).

Funkcję $f(\varepsilon', T)$ można przedstawić w różnej postaci [6]. W pracy [6] przyjęto na przykład funkcję $f(\varepsilon', T) = (A - CT^{\nu})\arctan(D\varepsilon')$, której stałe A, C, D oraz ν wyznaczane są na podstawie wyników izotermicznych badań zmęczeniowych. W niniejszym opracowaniu przyjęto opis, w którym krzywa zbudowana jest z dwóch odcinków reprezentujących zakres odkształceń sprężystych i sprężysto-plastycznych, w którym założono umocnienie materiału. Moduł sprężystości - E, granicę plastyczności R_e, współczynnik wytrzymałości cyklicznej - C oraz współczynnik n charakteryzujący umocnienie materiału przyjęto jako wielkości zależne od temperatury:

$$f(\varepsilon',T)=\begin{cases} E(T)\cdot\varepsilon', dla \varepsilon' < \dfrac{R_e(T)}{E(T)} \\ R_e(T)+C(T)\cdot\left(\varepsilon'-\dfrac{R_e(T)}{E(T)}\right)^{n(T)}, dla \varepsilon' \geq \dfrac{R_e(T)}{E(T)} \end{cases} \quad (1)$$

Stosując metodę przedstawioną w pracach [6,7], po wyznaczeniu zależności $R_e(T)$, $C(T)$, $E(T)$ oraz $n(T)$, na podstawie badań zmęczenia niskocyklowego, można określić przebieg pętli histerezy przy cyklicznym sprężysto-plastycznym odkształcaniu w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego (rys. 1b). Szczegółową procedurę zawierają prace [6,7].



Rys. 1. Przebieg ustalonych pętli histerezy w zależności od temperatury (a) oraz weryfikacja przedstawionego modelu (b)

Opracowanie zawierało będzie tok postępowania oraz rezultaty obliczeń i ich weryfikację eksperymentalną przeprowadzoną na podstawie testów zmęczenia niskocyklowego oraz wybranych wyników badań zmęczenia cieplno-mechanicznego.

LITERATURA

[1] Lemaitre J., Chaboche J.-L., 1990. Mechanics of solid materials. Cambridge University Press.
[2] Chaboche J.-L., 1993. Cyclic viscoplastic equations part I: e thermodynamically consistent formulation. Journal of Applied. Mech. 60, 813-821.
[3] Kichenin J., Dang Van K., Boytard K., 1996. Finite element simulation of a new two-dissipative mechanisms model for bulk medium-density polyethylene, J. Mater. Sc. 31, 1653-1661.
[4] Figiel Ł., Günter B., 2008. Modelling the high-temperature longitudinal fatigue behaviour of metal matrix composites (SiC/Ti-6242): Nonlinear time-dependent matrix behaviour. International Journal of Fatigue 30(2), 268-276.
[5] Okrajni J., Junak G., Marek A., 2008. Modelling of the deformation process under thermo-mechanical fatigue conditions, International Journal of Fatigue 30(2), 324-329.
[6] Okrajni J., Junak G., Marek A., 2007. Description of the deformation process under thermo-mechanical fatigue. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 21(2), 15-24.

Roland PAWLICZEK

WPŁYW WARTOŚCI ŚREDNIEJ W OBCIĄŻENIACH BLOKOWYCH NA KSZTAŁT PĘTLI HISTEREZY PRZY ZGINANIU PRÓBEK ZE STALI S355

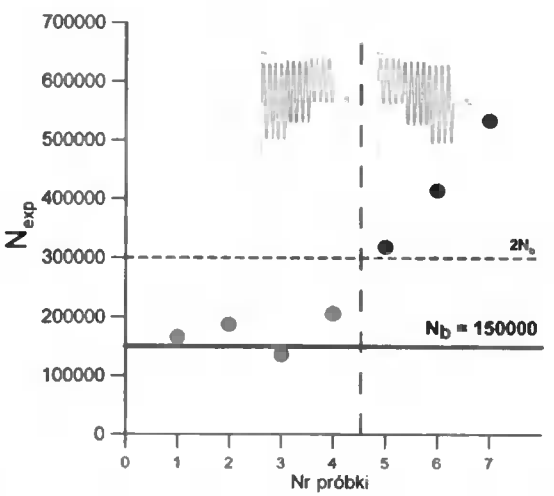
Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

1. WPROWADZENIE

Podstawową charakterystyką opisującą zachowanie się materiału w warunkach obciążeń zmęczeniowych jest zależność pomiędzy naprężeniami w materiale a wywołanymi ich działaniem odkształceniami [1,2]. Dla dużych obciążeń obserwuje się powstawanie pętli histerezy, a pole objęte pętlą histerezy jest utożsamiane z energią właściwą odkształceń plastycznych rozpraszaną w materiale podczas cyklu obciążenia. Parametr ten jest bazą dla energetycznych kryteriów zmęczeniowych [3, 4]. W przypadku złożonych warunków obciążenia pojawiają się zjawiska, które wpływają na zmianę kształtu i położenia pętli histerezy. Celem pracy jest analiza wpływu obciążeń blokowych z udziałem wartości średniej obciążenia na zmiany w relacji naprężenie-odkształcenie.

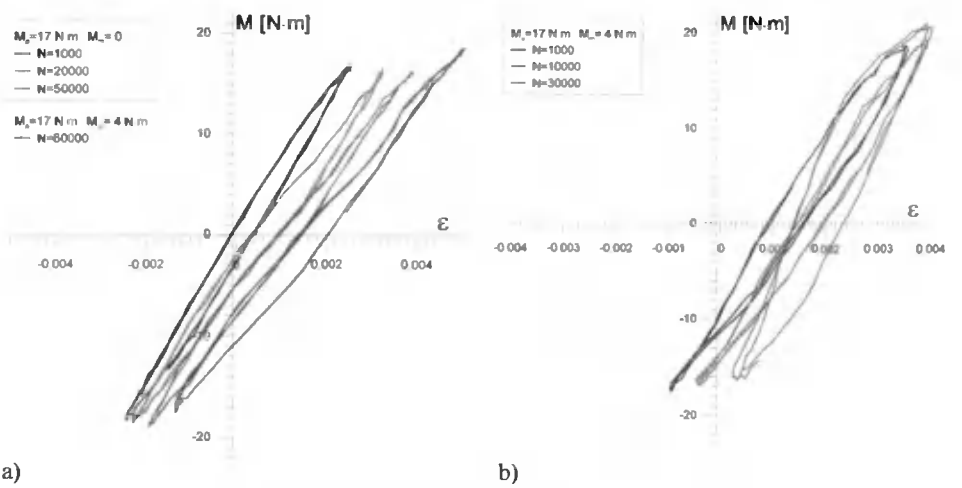
2. BADANIA ZMĘCZENIOWE W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ BLOKOWYCH

Przeprowadzone badania zmęczeniowe w warunkach obciążeń blokowych z udziałem wartości średniej wykazały silną zależność trwałości zmęczeniowej od kierunku zmian wartości średniej obciążenia [5]. Badania przeprowadzono dla zbliżonych wartości naprężenia maksymalnego (rys. 1).



Rys. 1. Trwałości eksperymentalne dla bloku N_b = 150000 cykli

Badania wykazały, że wyższe wartości obciążenia średniego przy mniejszych amplitudach występujące na początku cyklu obciążenia powodują umocnienie materiału i trwałość jest dwukrotnie wyższa w porównaniu do bloków ze wzrastającym obciążeniem średnim. W celu przeanalizowania zmian zachodzących w materiale warunkach obciążeń blokowych zarejestrowano przebiegi czasowe obciążenia i odpowiadających im odkształceń.



a) b)

Rys. 2. Pętle histerezy przy zginaniu dla M_a = 17N·m

Zwiększanie amplitudy obciążenia powoduje powstawanie odkształceń plastycznych w większej objętości materiału i powstanie większych uszkodzeń w materiale. Widoczny jest efekt cyklicznego osłabiania się materiału (rys. 2a). Gwałtowne zwiększenie obciążenia średniego powoduje wzrost odkształcenia średniego i utrzymanie efektu płynięcia materiału. Stała wartość momentu średniego M_m = 4 N·m od początku testu (rys. 2b) skutkuje pojawieniem się większych odkształceń średnich i pętli histerezy o większych polach w porównaniu do testu z początkową wartością średnią równą zero. Można również zauważyć efekt umacniania się materiału wraz ze wzrostem liczby cykli niszczących.

LITERATURA

[1] Kocańda S., Szala J., 1989. Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa.
[2] Kocańda S., Kocańda A., 1989. Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali. PWN Warszawa.
[3] Morrow J., 1965. Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. International Friction, Damping and Cyclic Plasticity.
[4] Łagoda T., Macha E., Będkowski W., 1999. A critical plane approach based on energy concepts: Application to biaxial random tension-compression high-cycle fatigue regime. Int. J. Fatigue 21, 431-443.
[5] Pawliczek R., 2005. Trwałość zmęczeniowa próbek ze stali 18G2A w warunkach blokowych obciążeń zginających z wartością średnią. Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej 305, Mechanika 83, 167-174.

Łukasz PEJKOWSKI, Dariusz SKIBICKI

ANALIZA PORÓWNAWCZA CAŁKOWYCH KRYTERIÓW ZMĘCZENIOWYCH W ZAKRESIE SZACOWANIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ DLA OBCIĄŻEŃ NIEPROPORCJONALNYCH

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. WSTĘP

Charakterystyczną cechą obciążeń nieproporcjonalnych jest zmiana kierunków osi głównych w trakcie cyklu obciążenia. Zjawisko to powoduje uruchomienie wielu kierunków poślizgu, co ma istotny wpływ na właściwości zmęczeniowe materiału. W zależności od wrażliwości materiału na nieproporcjonalność obciążenia i stopnia nieproporcjonalności, zaobserwować można nawet dziesięciokrotny spadek wytrzymałości zmęczeniowej [1, 2] i 25% spadek granicy zmęczenia.

Istnieje pogląd, że podejściem dającym najlepsze wyniki w szacowaniu trwałości dla obciążeń nieproporcjonalnych jest podejście całkowe. Polega ono na całkowaniu parametru zniszczenia na wszystkich płaszczyznach przechodzących przez rozpatrywany punkt materiału.

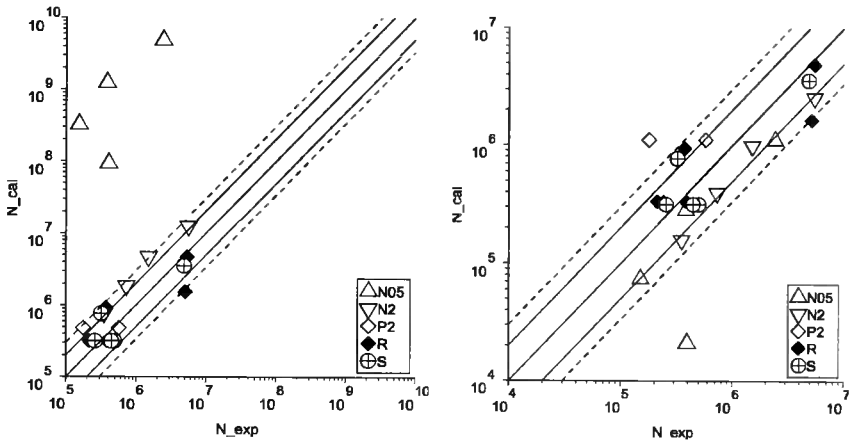
2. ANALIZOWANE KRYTERIA

W pracy trzy najczęściej spotykane kryteria całkowe, tj. kryterium Zennera [3, 4] i dwa kryteria Papadopoulosa (1997 i 2001) [5, 6] zostały porównane z kryterium McDiarmida reprezentujące konkurencyjne podejście płaszczyzny krytycznej oraz kryterium opartego na powszechnie stosowanej hipotezie Hubera-Misesa-Hencky'ego.

3. WYNIKI PORÓWNANIA KRYTERIÓW

Obliczone za pomocą kryteriów naprężenia ekwiwalentne zostały powiązane z trwałością zmęczeniową powszechnie stosowanym równaniem Basquina. Jego współczynniki uzyskane zostały na podstawie wyników eksperymentalnych dla prób jednoosiowego rozciągania-ściskania lub skręcania.

Analiza polegała na porównaniu trwałości eksperymentalnych z trwałościami obliczonymi uzyskanymi na podstawie wspomnianych kryteriów (rys. 1). Do porównania zostały wykorzystane dwa parametry statystyczne w postaci średniego rozrzutu trwałości oraz błędu średniokwadratowego [7].



Rys. 1. Porównanie trwałości zmęczeniowej eksperymentalnej N_exp z obliczeniową N_cal dla stali 1045 dla kryterium McDiarmida (a) oraz kryterium Papadopoulosa (2001) (b)

4. WNIOSKI

Na podstawie wykorzystanych trwałości eksperymentalnych można stwierdzić, że:

- najlepsze wyniki uzyskano dla kryterium Papadopoulosa (2001) i kryterium Zennera, a najgorsze dla kryterium opartego na hipotezie HMH i kryterium McDiarmida,
- żadne z analizowanych kryteriów nie powinno być stosowane do obliczeń trwałości w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych,
- kryterium całkowe jest bardziej skuteczne dla nieproporcjonalnych przebiegów obciążeń, jednak nie zawsze zapewnia akceptowalne wyniki.

LITERATURA

[1] Ellyin F., Gołoś K., XIA Z., 1991. In-phase and out-of-phase multiaxial fatigue. Transactions of the ASME 113, 112-118.
[2] Socie D.F., 1987. Multiaxial Fatigue Damage Models. Journal of Engineering Materials and Technology 109, 293-298.
[3] Zenner H., Simbürger A., Liu J., 2000. On the fatigue limit of ductile metals under complex multiaxial loading. International Journal of Fatigue 2, 137-145.
[4] Zenner H., 1983. Neue Vorschläge zur Berechnung der Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung. Konstruktion 3, 313-318.
[5] Papadopoulos I.V., 1994. A new criterion of fatigue strength for out-of-phase bending and torsion of hard metals, Fatigue 16, 377-384.
[6] Papadopoulos I.V., 2001. Long life fatigue under multiaxial loading. International Journal of Fatigue 23, 839-849.
[7] Walat K., Łagoda T., 2011. Trwałość zmęczeniowa elementów maszyn w płaszczyźnie krytycznej wyznaczonej przez ekstremum kowariancji naprężeń. Oficyna wydawnicza Politechniki Opolskiej, 99-104.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki

Łukasz PEJKOWSKI, Dariusz SKIBICKI

MODYFIKACJA ZMĘCZENIOWEGO KRYTERIUM ZENNERA ZE WZGLĘDU NA NIEPROPORCJONALNOŚĆ OBCIĄŻENIA

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. WSTĘP

Kryteria całkowe, do których należy kryterium Zennera [1], wykorzystują podejście polegające na sumowaniu parametru zniszczenia na wszystkich możliwych płaszczyznach przechodzących przez rozpatrywany punkt materiału. W przypadku obciążeń nieproporcjonalnych, wektor naprężenia stycznego zmienia w trakcie cyklu swój moduł oraz położenie. Istniejące kryteria uogólniają amplitudę wektora stycznego na podstawie różnych metod analizy kreślonej przez ten wektor ścieżki [2]. Proponowana modyfikacja kryterium Zennera polega na uwzględnieniu nie tylko zmiany modułu, ale również zmiany położenia wektora naprężenia stycznego w trakcie cyklu obciążenia zmęczeniowego.

2. PROPOZYCJA MODYFIKACJI KRYTERIUM ZENNERA

Kryterium Zennera zapisać można w postaci nierówności:

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{15}{8\pi}\int_{\gamma=0}^{\pi}\int_{\varphi=0}^{2\pi}(a\tau_{\gamma\varphi,a}{}^2 + b\sigma_{\gamma\varphi,a}{}^2)\sin\gamma\, d\gamma d\varphi} \le Z_{rc}$$

gdzie τ i σ oznaczają odpowiednio amplitudę naprężenia stycznego i normalnego, a i b są współczynnikami wyznaczanymi na podstawie granic zmęczenia na rozciąganie-ściskanie i skręcanie, a symbole γ i φ oznaczają kąty wyznaczające położenie rozpatrywanej płaszczyzny.

Wielkością odzwierciedlającą zmianę położenia wektora naprężenia stycznego wydaje się być jego chwilowa prędkość kątowa. Proponowana modyfikacja kryterium Zennera polega na zmianie wartości amplitudy naprężenia stycznego w każdej chwili cyklu poprzez dodanie współczynnika wyznaczonego na podstawie chwilowej prędkości kątowej. Zmodyfikowane kryterium zapisać można w postaci:

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{15}{8\pi}\int_{\gamma=0}^{\pi}\int_{\varphi=0}^{2\pi}(a\tau_{\gamma\varphi,am}{}^2 + b\sigma_{\gamma\varphi,a}{}^2)\sin\gamma\, d\gamma d\varphi} \le Z_{rc}$$

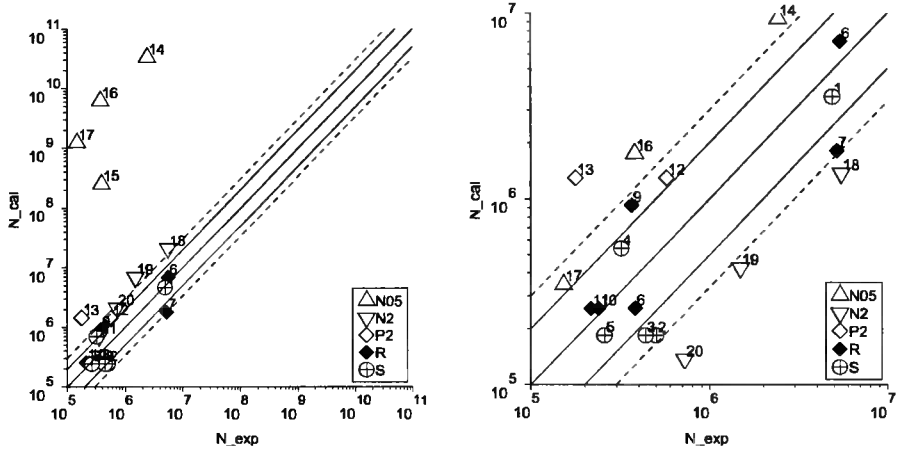
gdzie: $\tau_{\gamma\varphi,am}$ oznacza zmodyfikowaną amplitudę naprężenia stycznego. Wyznaczana jest ona na podstawie zmian modułu wektora naprężenia stycznego zmodyfikowanych o jego chwilową prędkość kątową. Zapisać ją można w następujący sposób:

$$\tau_{\gamma\varphi,am} = \left(\tau_{\gamma\varphi} + \left\|\tau_{\gamma\varphi}\frac{d\varphi}{dt}\bar{p}^{\circ}\right\| * c\right)_{\max(t)}$$

gdzie wektor $\bar{p}^{\circ}$ jest wektorem jednostkowym prostopadłym do $\tau_{\gamma\varphi}$, a c współczynnikiem uzależnionym od rodzaju materiału.

3. UZYSKANE REZULTATY MODYFIKACJI

Na rys. 1 przedstawione zostały wykresy porównujące trwałość eksperymentalną z obliczeniową dla stali 1045 [3], wyznaczoną za pomocą kryterium Zennera (rys. 1a) oraz po uwzględnieniu proponowanej modyfikacji (rys. 1b).



a) b)

Rys. 1. Porównanie trwałości eksperymentalnej i obliczeniowej dla stali 1045, wyznaczonej za pomocą kryterium Zennera (a) oraz po proponowanej modyfikacji (b)

Modyfikacja kryterium Zennera o współczynnik wyznaczony na podstawie chwilowej prędkości kątowej wektora naprężenia, wydaje się poprawiać uzyskiwane wyniki obliczeń dla obciążeń nieproporcjonalnych.

LITERATURA

[1] Zenner H., Simbürger A., Liu J., 2000. On the fatigue limit of ductile metals under complex multiaxial loading, Int. J. of Fatigue 2, 137-145.
[2] Skibicki D., Pejkowski Ł., Integrals fatigue criteria evaluation for life estimation under uniaxial, combined proportional and non-proportional loadings. J. of Theoretical and Applied Mechanics (w druku).
[3] Verreman Y., Guo H., 2007. High-cycle fatigue mechanisms in 1045 steel under non-proportional axial-torsional loading. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 30, 932-946.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Piotr REYMER, Andrzej LESKI, Krzysztof DRAGAN

BADANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ STRUKTURY SZKOLNEGO SAMOLOTU

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Niezawodności i Bezpieczeństwa,
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa

1. WSTĘP

Artykuł ten przedstawia badanie trwałości zmęczeniowej płatowca wojskowego samolotu szkolno-treningowego PZL-130 "Orlik" w ramach pełnoskalowej próby zmęczeniowej. Wszelkie opisane zagadnienia zostały wykonane w ramach programu SEWST (System Eksploatacji Według Stanu Technicznego) finansowanego przez Ministerstwo Obrony Narodowej realizowanego przez EADS-PZL "Okęcie" we współpracy z Instytutem technicznym Wojsk Lotniczych oraz VZLU (Výzkumný a Zkušební Letecký Ustav, Praga, Czechy).

W ramach programu realizowany jest szereg zadań, których celem jest umożliwienie przejścia na system eksploatacji według stanu technicznego (*damage tolerance*). W ramach części programu dotyczącej struktury nośnej samolotu realizowana jest pełnoskalowa próba zmęczeniowa, której głównymi celami są:

- potwierdzenie, a następnie zwiększenie przyjętego resursu płatowca,
- zdefiniowanie miejsc krytycznych, w których mogą powstawać uszkodzenia zmęczeniowe mające wpływ na integralność struktury,
- definicja prędkości propagacji uszkodzeń zmęczeniowych.

2. PRZYGOTOWANIE PRÓBY ZMĘCZENIOWEJ

Zgodnie z założeniami programu, widmo obciążeń do próby zmęczeniowej powstało na podstawie rzeczywistego profilu eksploatacji samolotów PZL-130 "Orlik" TC-II w Polskich Siłach Powietrznych. Pomiar obciążeń w locie wykonano za pomocą układu tensometrów foliowych [1] w trakcie lotów eksperymentalnych reprezentujących większość ćwiczeń wykonywanych podczas programu szkoleń pilotów wojskowych. Dodatkowo widmo uzupełniono o obciążenia zarejestrowane podczas lotów pokazowych.

Na podstawie zarejestrowanych obciążeń oraz znanych archiwalnych statystyk utworzono widmo reprezentujące 194 loty, zawierające obciążenia związane z: lotami, buffetingami, lądowaniami i kołowaniami, odpowiadające 200 symulowanym godzinom lotu (SFH). Dodatkowo przeprowadzono badania metod uzyskiwania prążków na powierzchni złomu zmęczeniowego poprzez wprowadzenie specjalnych markerów do widma obciążeń [2]. Tak przygotowane obciążenia wprowadzane są w strukturę płatowca za pomocą 20 siłowników hydraulicznych. Egzemplarz płatowca przeznaczony do testu wyposażono w tensometryczny układ pomiarowy identyczny z tym wykorzystanym do pomiaru obciążeń w locie, co pozwala na monitorowanie stanu wytężenia badanej struktury płatowca.

2. REALIZACJA TESTU

Próba zmęczeniowa realizowana jest we VZLU. W trakcie trwania próby przewiduje się wykonywanie badań nieniszczących w celu wczesnego wykrywania uszkodzeń zmęczeniowych. Przewiduje się trzy poziomy inspekcji:

- podstawowy przegląd wizualny – co 1 000 SFH,
- badanie NDT z odłączeniem płatowca od siłowników – co 5 000 SFH.
- badanie NDT z odłączeniem płatowca od siłowników oraz rozłączeniem skrzydeł i kadłuba – co 10 000 SFH.

W przypadku wykrycia uszkodzenia w miejscu krytycznym przewiduje się zmniejszenie interwałów między inspekcjami oraz wprowadzenie ciągłego monitorowania wykrytego pęknięcia. Przewiduje się naprawę krytycznych uszkodzeń poprzez obróbkę oraz zastosowanie kompozytowych łat boronowych [3].

3. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Po przeprowadzeniu próby zmęczeniowej, poprzez realizację 36 000 SFH, przewiduje się wykonanie statycznego testu wytrzymałości resztkowej do około 70% maksymalnych obciążeń. Następnie wykonana zostanie inspekcja rozbiórkowa, w ramach której zbadane zostaną powierzchnie pęknięć zmęczeniowych powstałych w strukturze płatowca w trakcie testu. Dzięki wspomnianej wcześniej metodzie uzyskiwania prążków zmęczeniowych na powierzchni złomu możliwa będzie szczegółowa analiza prędkości propagacji pęknięć, w tym w miejscach niedostępnych dla badań nieniszczących w trakcie trwania testu.

LITERATURA

[1] Reymer P., Leski A., 2011. Flight loads acquisition for PZL-130 "Orlik" TC-II full scale fatigue test. Fatigue of Aircraft Structures. Warszawa, 78-85.
[2] Barter A.A., Molent L., Wanhill R.J.H., 2009. Marker loads for quantitative fractography of fatigue cracks in aerospace alloys. 25th ICAF Symposium: Bridging the Gap Between Theory and Operational Practice. Rotterdam.
[3] Anderson A., Parker R., 1999. Full-scale fatigue test of the Pilatus PC9/A trainer aircraft. 20th ICAF Symposium: Structural Integrity for the next Millennium. Bellevue, Waszyngton USA.
[4] Molent L., Barter S.A., White P., Dixon B., 2009. Damage tolerance demonstration testing for the Australian F/A-18. International Journal of fatigue 31, 1031-1038.
[5] Rutledge R.S., Backman D.S., Hiscocks R.J., 2009. Evaluation, modification and damage tolerance of an in-service aircraft critical area. 25th ICAF Symposium: Bridging the Gap Between Theory and Operational Practice, Rotterdam.
[6] Leski A., Klimaszewski S., Kurdelski M., 2009. The fatigue life assesment of PZL-130 Orlik structures based on historical usage data. Fatigue of Aircraft Structures, Warszawa, 69-77.

Grzegorz ROBAK, Marcel SZYMANIEC, Tadeusz ŁAGODA

PROMIEŃ FIKCYJNY JAKO NARZĘDZIE DO OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW Z KARBEM

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny,
ul. Mikołajczyka 5, 45-270 Opole

1. WSTĘP

Od wielu lat prowadzi się badania dotyczące zmęczenia elementów maszyn. Przeprowadzanie tego rodzaju badań wymusiły na konstruktorach liczne awarie, które powodowały kosztowne naprawy uszkodzeń lub zniszczeń całych zespołów czy konstrukcji. W skrajnych przypadkach takie awarie często stawały się zagrożeniem dla samego człowieka.

Obecnie problem oszacowania trwałości zmęczeniowej elementów maszyn i konstrukcji stał się istotny i dostrzegany w każdej dziedzinie przemysłu. Dostrzegany jest wszędzie tam, gdzie stawiane są odpowiednie wymagania trwałości, niezawodności oraz bezpieczeństwa.

Jednym z głównych powodów, dla których prowadzi się badania i tworzy się skomplikowane algorytmy obliczeniowe, jest optymalizacja elementów części maszyn. Przeprowadzanie optymalizacji części maszyn wymusza na konstruktorach projektowanie elementów o skomplikowanej geometrii z jednoczesnym zachowaniem odpowiedniej wytrzymałości i trwałości.

Celem pracy jest porównanie wyników badań przeprowadzonych na elementach walcowych z naciętym karbem obrączkowym przy zastosowaniu promienia fikcyjnego [1, 2].

2. WYZNACZENIE WARTOŚCI PROMIENIA FIKCYJNEGO DLA ELEMENTÓW Z KARBEM OBRĄCZKOWYM

W celu wyznaczenia trwałości zmęczeniowej posłużono się koncepcją promienia fikcyjnego według propozycji Neubera [1]. Fikcyjny promień w dnie karbu posłużył do wyznaczenia maksymalnych naprężeń w dnie karbu. Wyznaczenie tego promienia wynika z uśrednienia naprężeń w dnie karbu. Fikcyjny promień w dnie karbu opisany został zależnością:

$$\rho_f = \rho + s\rho^* \tag{1}$$

gdzie:

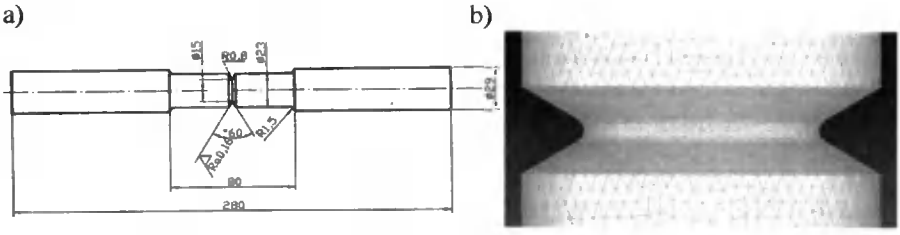
- s – współczynnik wieloosiowości,
- ρ^* – zastępcza długość mikrostrukturalna,
- ρ – rzeczywisty promień w dnie karbu.

Współczynnik wieloosiowości s dla rozciągania i elementów okrągłych wyliczony został z kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego według zależności:

$$s = \frac{5 - 2\nu + 2\nu^2}{2 - 2\nu + 2\nu^2} \tag{2}$$

3. WERYFIKACJA ZAŁOŻEŃ PROMIENIA FIKCYJNEGO NA PODSTAWIE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Weryfikację założeń promienia fikcyjnego przeprowadzono zestawiając trwałość obliczeniową z wynikami badań próbek z karbem (rys. 1a) wykonanych ze stali St3S [3]. Naprężenia w dnie karbu wyznaczone zostały przy użyciu metody elementów skończonych. Na rysunku 1b) przedstawiono rozkład elementów skończonych w dnie karbu.



Rys. 1. Geometria próbki z karbem obrączkowym (a), rozkład elementów skończonych w dnie karbu (b)

LITERATURA

[1] Neuber H., 1968. Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitberechnungen. Konstruktion 20, 245-251.
[2] Łagoda T., 2008. Lifetime estimation of welded joint, Springer.
[3] Słowik J., Łagoda T., 2007. Trwałość zmęczeniowa elementów z karbem obrączkowym w warunkach cyklicznego rozciągania-ściskania. XX Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, 287-289.

Jan SADOWSKI

PROBLEM OCENY PUNKTU INICJACJI ROZWOJU PĘKNIĘCIA W PRÓBIE UDAROWEGO ZGINANIA

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Identyfikacja zjawisk fizycznych zachodzących w czasie próby dynamicznego zginania w badanych próbkach, zwłaszcza dla wyznaczenia siły inicjującej pękanie *Fp*, oraz energii potrzebnej do zainicjowania pękania *Ep*, jest na obecnym etapie badań nadal problemem otwartym. Dokładna znajomość punktu inicjacji pękania pozwala na poprawne obliczenie parametrów dynamicznej odporności na pękanie np. dynamicznego krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Id} i dynamicznej całki I_{Id}. Na podstawie obliczonych parametrów można także ocenić inne wielkości, takie jak: krytyczne dynamiczne rozszerzenie pęknięcia – CODR, dynamiczny moduł rozdzierania badanego materiału Tmat, czy krytyczną wielkość wady ad, w warunkach dynamicznych obciążeń. Wyznaczane parametry są bardzo ważnymi stałymi materiałowymi, stosowanymi w obliczeniach inżynierskich konstrukcji, pracujących przy obciążeniach udarowych.

Obecnie zauważa się różne sposoby interpretacji oceny punktu inicjacji pękania w warunkach obciążeń dynamicznych, co skłoniło autora artykułu do przedstawienia obecnego stanu wiedzy na ten temat i podzielenia się własnymi wynikami badań.

Według propozycji obowiązujących norm ASTM, ISO14556, oraz ESIS, za punkt początku inicjacji pękania przyjmowany jest punkt siły maksymalnej Fm, określony na podstawie otrzymanego z próby dynamicznego zginania, wykresu siła-przemieszczenie. Autorzy pracy [1] wykazują, iż jest to siła leżąca prawie w połowie między dynamiczną siłą na granicy plastyczności *Fgy* a siłą maksymalną *Fm*.

Autorzy pracy [2] na podstawie matematycznej obróbki zdejmowanych w próbie udarowego zginania przebiegów $P = f(f)$ lub $P = f(t)$, za pomocą opracowanego programu FRACDYNA [2], oceniali punkt inicjacji pękania, stosując obróbkę statystyczną zarejestrowanych przebiegów metodami: różniczkowania, aproksymacji, wygładzania i sklejania otrzymanych z badań szybkozmiennych przebiegów. Z kolei autorzy badań [3] do oceny wyznaczania punktu inicjacji pękania zastosowali analizę waveletową sygnału magnetycznego, otrzymanego z czujników usytuowanych na bijaku młota udarowego. Wykazali jej dokładność w stosunku do metody badań zmiany podatności zginanej próbki (CCRM) i metody siły maksymalnej.

W pracy [4] autorzy używali do oceny punktu inicjacji pękania metodę emisji magnetycznej (ME) i pomiarów tensometrycznych (PD). Autor pracy [5] wykorzystał do oceny punktu inicjacji pękania metodę zaproponowaną przez Kobayasego, tj. metodę zmiany podatności próbki [1].

Omawiane metody na obecnym etapie wiedzy, może i są bardzo dokładne, lecz wymagają bardzo skomplikowanej aparatury i złożonej metodyki badawczej, a także złożonego oprogramowania celem obróbki zdejmowanych w próbie udarowej przebie-

gów. Wyjątkiem może być metoda zmiany podatności próbki (CCRM), która jest mało pracochłonna, a wynik można otrzymać z badań jednej próbki zginanej udarowo.

2. BADANIA WŁASNE

Autor pracy postanowił przeprowadzić badania porównawcze oceny punktu inicjacji pękania na wybranych materiałach, takich jak: stale 18G2A i St3S oraz stopu aluminium AK12, stosując różne techniki badawcze. Zastosowano i przyjęto jako wzorcową, bardzo dokładną metodę zatrzymania pęknięcia oraz metodę pomiarów tensometrycznych i porównano je z innymi metodami, tj.: zmiany podatności próbki, metodami obróbki statystycznej wykresów oraz metodą siły maksymalnej.

W tabeli 1 wykazano procentowe różnice odchyleń poszczególnych metod: zmiany podatności (3), aproksymacji przebiegu (4), różniczkowania przebiegu (5) i siły maksymalnej (6); w stosunku do dokładnych metod: wzorcowej – zatrzymania pęknięcia (1) i badań tensometrycznych (2).

Tabela 1. Różnice procentowych odchyleń poszczególnych metod oceny punktu inicjacji pękania badanych materiałów

Materiał badany	Różnice procentowe [%]								
	(1)/(2)	(1)/(3)	(1)/(4)	(1)/(5)	(1)/(6)	(2)/(3)	(2)/(4)	(2)/(5)	(2)/(6)
18G2A	5,52	9,56	19,32	23,22	26,91	2,44	13,08	16,78	19,44
St35	2,26	8,52	21,12	25,35	35,88	6,13	18,45	22,58	32,88
Ak12	-4,71	1,91	15,98	24,18	28,38	6,92	21,71	30,31	34,71

Z przedstawionych danych, wynika iż wziąwszy pod uwagę najdokładniejszą metodę badawczą, jaką jest metoda zatrzymania pęknięcia (wielu próbek) i metodę pomiarów tensometrycznych wynika wyraźnie, że metoda zmiany podatności próbki dla oceny siły Fp inicjującej pękanie jest najbliższa omawianym metodom. Różnice są nieznaczne i kształtują się dla badanych materiałów na poziomie 8-10%.

LITERATURA

[1] Kobayashi T., Yamamoto J., Niinomi M., 1998. Introduction of a New Dynamic Fracture Toughness Evaluation System. Journal of Testing and Evaluation 21(3), 145-153.
[2] Ranatowski E., Sadowski J., 1995. Possibilities of mathematical processing of the impact bend of charpy v samples diagram. Journal of Theoretical and Applied Machanics, 237-248.
[3] Lis Z., Narbudowicz K., 1997. Zastosowanie Krzyżowego efektu magnetomechanicznego do wyznaczania inicjacji pękania w próbie Charpy. VI Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce, 237-249.
[4] Radakovic Z., Sedmak A., 2001. Determination od ductile crack initiation Rusing precracked Charpy specimens. Charpy Centenary Conference, Paris, 611-618.
[5] Sadowski J., 2011. Wpływ czynników technologicznych na dynamiczną odporność na pękanie wybranych stopów odlewniczych. [W:] Zagadnienia Mechaniki Stosowanej, t. 3. Wyd. Uczeln. UTP, Bydgoszcz, 87-97.

Dariusz SKIBICKI, Michał BURAK

WYZNACZANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ W PROGRAMIE LS-DYNA ZA POMOCĄ MODELU LEMAITRE'A

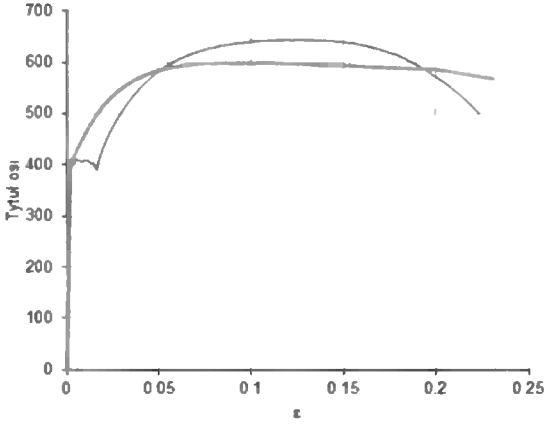
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
dariusz.skibicki@utp.edu.pl

W programie do obliczeń metodą elementów skończonych LS-Dyna do obliczeń trwałości quasi-statycznej i niskocyklowej proponuje się model materiałowy *MAT_DAMGE_3. Materiał ten zawiera model plastyczności cyklicznej ze wzmocnieniem kinematycznym i izotropowym oraz model zniszczenia dla obciążeń cyklicznych wg Lemaitre'a [1]. W pracy na podstawie właściwości monotonicznych stali C45 dokonano próby doboru stałych dla modelu plastyczności i modelu zniszczenia [2] a następnie wykonano próbę obciążenia cyklicznego w celu oszacowania trwałości zmęczeniowej.

Dla obciążenia monotonicznego jednoosiowego rozciągania model umocnienia ma postać [2]:

$$\sigma = \sigma_y + \frac{C_1}{\gamma_1}[1 - exp(-\gamma_1 \varepsilon^p)] + \frac{C_2}{\gamma_2}[1 - exp(-\gamma_2 \varepsilon^p)] + H\varepsilon^p \quad (1)$$

Na podstawie próby rozciągania uzyskano następujące parametry: $C_1 = 7628{,}2, \gamma_1 = 43{,}1$, $C_1 = 2099{,}7, \gamma_1 = 31{,}1$. Przyjęto także $H = 0$. Wykonany dla tak zdefiniowanego materiału wykres rozciągania porównano z wykresem eksperymentalnym (rys. 1).

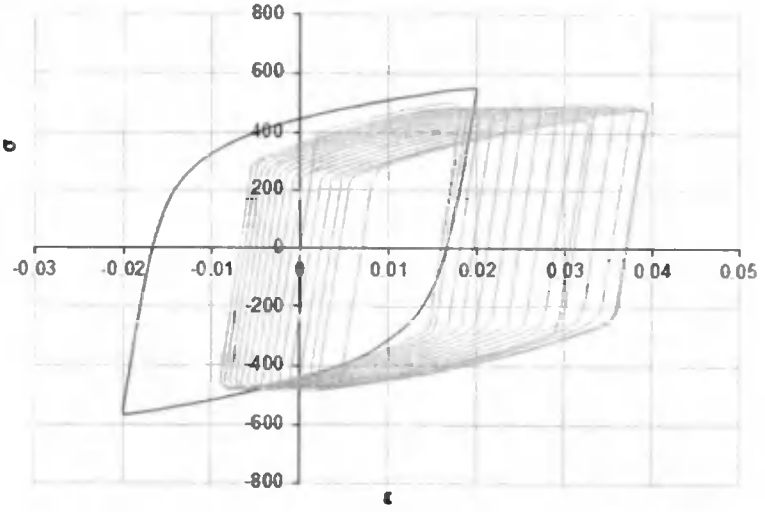


Rys. 1. Porównanie wykresów rozciągania uzyskanego eksperymentalnie i numerycznie

Następnie wyznaczono stałe modelu ewolucji uszkodzeń, który uzależnia parametr zniszczenia D od odkształcenia plastycznego w postaci:

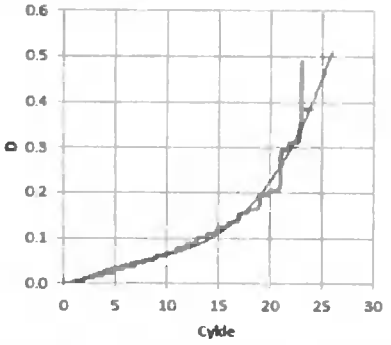
$$\dot{D} = \left(\frac{Y}{S}\right)^t \dot{\varepsilon}_p \quad (2)$$

gdzie Y jest prędkością uwalniania energii w procesie zniszczenia, S i t stanowią parametry materiałowe. Wielkości domyślne w programie LS-Dyna wynoszą $S = R_e/200, t = 1$. Kształt pętli zbliżony do eksperymentalnego (rys. 2) uzyskano dla $S = 2, t = 0{,}3$.



Rys. 2. Pętla eksperymentalna i pętle uzyskane numerycznie

Dla tak dobranych danych uzyskano trwałość 26 cykli, czyli 4-krotnie mniejszą od eksperymentalnej, która wynosiła 110 cykli. Program LS-Dyna daje możliwość wykonania wykresu zmian parametru uszkodzenia w czasie procesu zmęczeniowego (rys. 3).



Rys. 3. Kumulacja uszkodzenia w trakcie próby zmęczeniowej

LITERATURA

[1] Lemaitre J., Desmorat R., 2005. Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures, Springer.

[2] Huang Y., Mahin S.A., 2010. Simulating the Inelastic Seismic Behavior of Steel Braced Frames Including the Effects of Low-Cycle Fatigue. Pacific Earthqake Engineering Research Center.

Dariusz SKIBICKI, Janusz SEMPRUCH, Łukasz PEJKOWSKI

BADANIA TRWAŁOŚCI STALI X2CRNIMO17-12-2 DLA OBCIĄŻEŃ JEDNOOSIOWYCH, PROPORCJONALNYCH I NIEPROPORCJONALNYCH W STANIE DOSTAWY I W STANIE WYŻARZONYM

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
dariusz.skibicki@utp.edu.pl

Przedstawione w pracy wyniki badań odnoszą się do pierwszego etapu projektu badawczego, którego celem jest stworzenie metodyki badań programowanych dla obciążeń wieloosiowych o nieproporcjonalnie zmieniających się składowych przez adaptację idei jednoosiowych zmęczeniowych badań programowanych. W pierwszym etapie programu projektu przewidziano wykonanie badań referencyjnych: wykresów trwałości dla prób jednoosiowych, wieloosiowych proporcjonalnych i wieloosiowych nieproporcjonalnych.

Na podstawie wyników prób monotonicznego rozciągania, z zależności zaproponowanych w pracy [1], spośród 6 materiałów wytypowano materiał o największej wrażliwości na nieproporcjonalność, a mianowicie stal X2CrNiMo17-12-2 (parametr D_N, tabela 1).

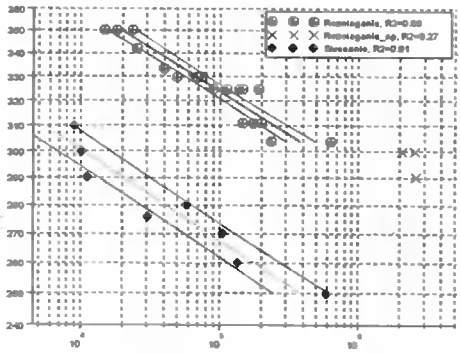
Tabela 1. Wyniki obliczeń szacowania stopnia wpływu nieproporcjonalności na trwałość

Materiał	$\beta = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} - 1.$	$\lg\|\chi\| = 0.705\beta - 1.22.$	$D_N = \left\|\frac{N^n}{N^p} - 1\right\|.$
C45	0,3302	0,1030	0,5
Cu-ETP	0,0958	0,0704	0,5
MO58	0,7800	0,2137	0,55
S355J2G3	0,1679	0,0791	0,5
X2CrNiMo17-12-2	0,5924	0,1576	0,58
X2CrNiMo17-12-2_w	1,4570	0,6414	0,75

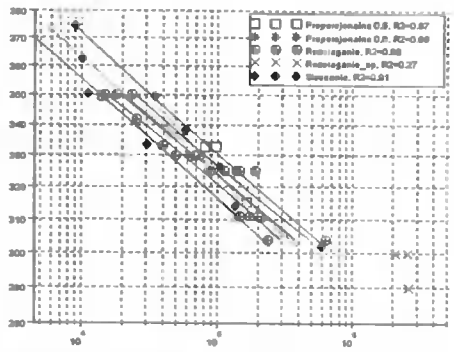
Dla wybranej stali wykonano wykresy trwałości zmęczeniowej dla rozciągania i skręcania (rys. 1). Na podstawie wyników obu prób przeprowadzono analizę wieloosiowych kryteriów zmęczeniowych pod względem poprawności szacowania trwałości [2]. Najlepszym kryterium okazało się kryterium Zennera [3]. Korzystając z tego kryterium, zaprojektowano wartości amplitud dla obciążeń złożonych proporcjonalnych rozciągania ze skręcaniem o dwóch różnych stosunkach amplitud $\tau_a/\sigma_a = 0,5$ i 0,826. Uzyskane wyniki trwałości dla obciążeń jednoosiowych i proporcjonalnych zebrano na wykresie na rysunku 2.

W następnym etapie wykonano badania trwałości pod obciążeniem nieproporcjonalnym. Badania przeprowadzono dla rozciągania ze skręcaniem o stosunkach amplitud nominalnych $\tau_a/\sigma_a = 0,5$ i 0,826 i dla kąta przesunięcia fazowego $\varphi = 90°$. Wyniki przedstawiono na rysunku 3. Trwałości uzyskane w warunkach obciążeń nieproporcjo-

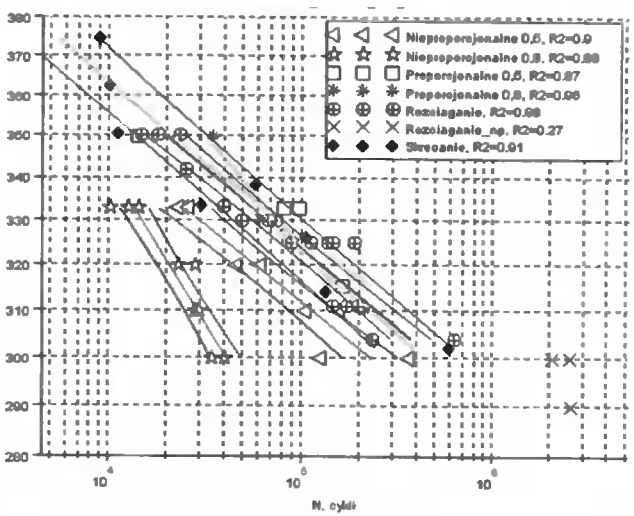
nalnych są znacznie mniejsze w stosunku do obciążeń jednoosiowych i złożonych proporcjonalnych i maleją wraz ze wzrostem stopnia nieproporcjonalności.



Rys. 1. Trwałości dla próby rozciągania i skręcania dla naprężeń nominalnych



Rys. 2. Trwałości dla próby rozciągania, skręcania i prób proporcjonalnych $\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ i 0,826, dla naprężeń ekwiwalentnych wg Zennera



Rys. 3. Trwałości dla obciążeń nieproporcjonalnych $\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ i 0,826 i przesunięcia kąta fazowego pomiędzy składowymi $\varphi = 90°$

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki

LITERATURA

[1] Borodii M.V., Shukaev S.M., 2007. Additional cyclic strain hardening and its relation to material structure, mechanical characteristics and lifetime. International Journal of Fatigue. 29, 1184-1191.

[2] Skibicki D., Pejkowski Ł., (przyjęty do druku). Integrals fatigue criteria evaluation for life estimation under uniaxial, combined proportional and non-proportional loadings. Journal of Theoretical and Applied Mechanics.

[3] Zenner H., Simbürger A., Liu J., 2000. On the fatigue limit of ductile metals under complex multiaxial loading. International Journal of Fatigue 2, 137-145.

Dariusz SKIBICKI, Janusz SEMPRUCH, Łukasz PEJKOWSKI

BADANIA MAKROPĘKNIĘĆ I PRZEŁOMÓW STALI X2CRNIMO17-12-2 PODDANEJ JEDNOOSIOWEMU, PROPORCJONALNEMU I NIEPROPORCJONALNEMU OBCIĄŻENIU ZMĘCZENIOWEMU

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
dariusz.skibicki@utp.edu.pl

W pracy przedstawiono analizę fraktograficzną przełomów zmęczeniowych próbek badawczych wykonanych ze stali stal X2CrNiMo17-12-2. Badania zostały przeprowadzone na dwuosiowej maszynie wytrzymałościowej Instron 8874, realizującej rozciąganie-ściskanie w zakresie +/-25 kN i skręcanie – 100 Nm. Próbki do badań wykonano zgodnie z normą ASTM E2207-02

Próbki poddane zostały wahadłowemu, sinusoidalnie zmiennemu: rozciąganiu-ściskaniu, skręcaniu, rozciąganiu-ściskaniu ze skręcaniem w fazie o stosunkach amplitud $\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ i 0,826 oraz rozciąganiu-ściskaniu ze skręcaniem o stosunkach amplitud $\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ i 0,826 z przesunięciem fazowym $\varphi = 90°$.

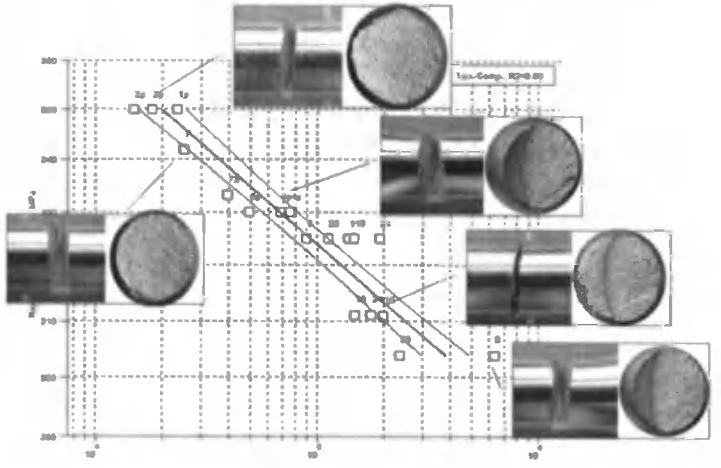
W przypadku rozciągania-ściskania przełom zmęczeniowy jest prostopadły do kierunku działania obciążenia (rys. 1.a). Pęknięcia inicjowały się z jednego ogniska znajdującego się na powierzchni próbki.

W przypadku skręcania, dla wysokich wartości naprężeń kierunek makropęknięcia pokrywał się z kierunkiem działania maksymalnych naprężeń stycznych (rys. 1b). Zmniejszenie amplitudy naprężenia spowodowało zmianę kierunku makropęknięcia o 45°, co oznacza że były prostopadłe do kierunków działania maksymalnych naprężeń głównych. Cechą charakterystyczną jest występowanie pęknięcia w obu płaszczyznach. Dla jeszcze mniejszej amplitudy naprężenia stycznego pęknięcie zachowywało kierunek, ale występowało tylko w jednej z płaszczyzn działania naprężenia głównego.

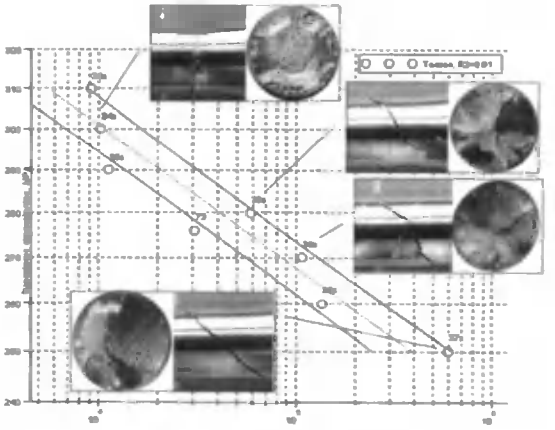
Dla obciążenia proporcjonalnego o stosunkach amplitud $\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ pęknięcia były prostopadłe do osi próbki (rys. 1c). Kierunek pęknięcia dla obciążenia o większym udziale naprężenia stycznego, tzn. dla stosunku amplitud $\tau_a/\sigma_a = 0{,}826$ były obrócone o około 20°. W obu przypadkach przełomy zmęczeniowe były charakterystyczne dla rozciągania-ściskania.

Obciążenia nieproporcjonalne powodowały, że przebieg śladu pęknięcia na powierzchni próbki był bardzo nieregularny. Dla obciążenia o stosunkach amplitud $\tau_a/\sigma_a = 0{,}5$ kierunki pęknięć były prostopadłe do kierunku działania naprężeń głównych. Dla obciążenia o stosunkach amplitud $\tau_a/\sigma_a = 0{,}826$ kierunki pęknięć były prostopadłe do osi próbki.

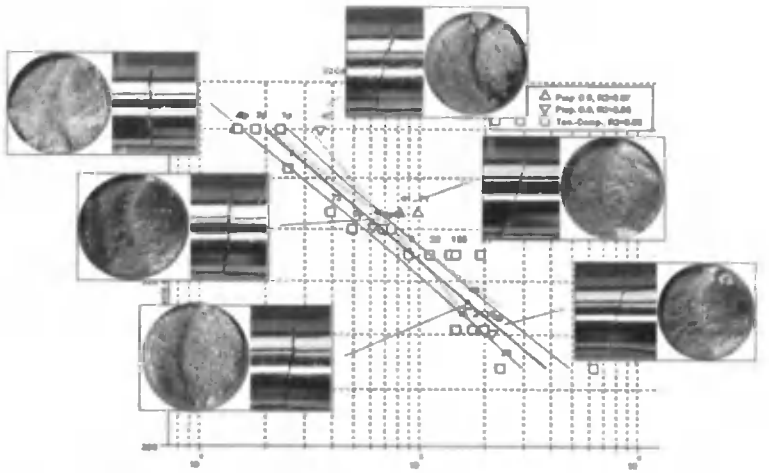
Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.



a)



b)



c)

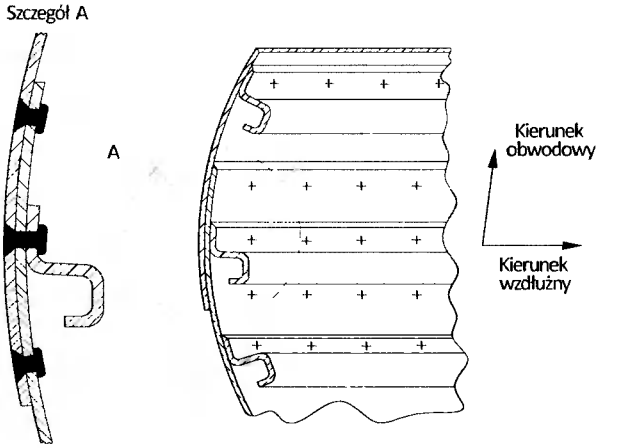
Rys. 1. Kierunki pęknięć zmęczeniowych oraz przełomy zmęczeniowe próbek poddanych rozciąganiu-ściskani (a), skręcaniu (b) oraz rozciąganiu-ściskaniu i skręcaniu w fazie (c)

**Małgorzata SKORUPA, Andrzej SKORUPA,
Tomasz MACHNIEWICZ, Adam KORBEL**

EKSPERYMENTALNE BADANIA INICJACJI I ROZWOJU PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH W ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZENIACH NITOWYCH KONSTRUKCJI LOTNICZYCH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Pomimo że w konstrukcjach lotniczych pojawiają się coraz częściej połączenia klejone, nitowanie pozostaje nadal podstawowym sposobem łączenia elementów tych konstrukcji. Jednym z typowych rozwiązań połączeń nitowanych jest połączenie zakładkowe. Występuje ono jako podłużne połączenie blach pokrycia kadłuba samolotu (rys. 1).



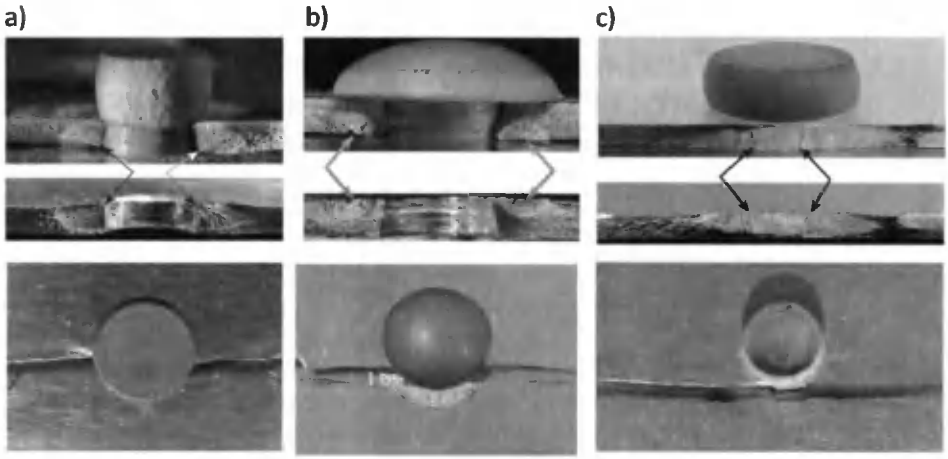
Rys. 1. Typowe trójrzędowe nitowe wzdłużne połączenie zakładkowe w kadłubie samolotu.

Sposób zniszczenia i wytrzymałość zmęczeniowa połączeń zakładkowych zależy od szeregu czynników technologicznych i konstrukcyjnych. Należą do nich m.in. siła zakuwania nitu i grubość łączonych blach.

W pracy omówiono zagadnienia te na przykładzie typowego trójrzędowego połączenia z blach z lotniczego stopu aluminium D16 o grubościach 0,8, 1,2 i 2 mm, łączonych nitami z łbem kulistym ze stopu PA24. Próbki poddawane były stałoamplitudowym obciążeniom zmęczeniowym przy różnych poziomach naprężeń nominalnych.

W praktyce przemysłowej siłę zakuwania reprezentuje stosunek średnicy zakuwki D do średnicy trzonu nitu d, który na ogół mieści się w granicach od 1,3 do 1,6. Rozważono wpływ tego stosunku na sposób inicjacji i rozwoju pęknięć oraz trwałość zmęczeniową na przykładzie próbek z blach o grubości 2 mm (rys. 2). Wykazano, że wraz ze wzrostem stosunku D/d rośnie trwałość złącza, a tor pęknięcia oddala się od przekroju netto blachy. Przy niższych stosunkach D/d zniszczeniu ulega blacha po stronie zakuw-

ki a przy większych – po stronie głowy fabrycznej. Trendy te wyjaśniono, analizując wyniki własnych pomiarów ekspansji otworów wypełnionych nitami zakutymi przy użyciu różnych sił.



Rys. 2. Miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych w zakładkowych połączeniach nitowych oraz ścieżki pękania charakterystyczne w przypadku: a) małej oraz (b, c) dużej siły zakuwania

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem grubości blach złącza na jego trwałość i mechanizm zniszczenia. Wykazano, że ze wzrostem grubości blachy maleje trwałość połączenia, czego przyczyną jest, tzw. wtórne zginanie wywołane mimośrodowością obciążenia złącza. Zaobserwowano, że próbki z blach o grubości 0,8 i 1,2 mm ulegały zawsze, niezależnie od stosunku D/d, zniszczeniu na skutek pęknięć pojawiających się w blachach po stronie zakuwki. Wyjaśniono, że przyczyną tego efektu jest mała sztywność złącza. W związku z tym w procesie nitowania, w blasze przyległej do zakuwki pojawiają się lokalne deformacje i wgniecenia blach inicjujące proces pękania złącza.

Przemysław STRZELECKI, Janusz SEMPRUCH***

EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA ANALITYCZNEJ METODY ESTYMACJI KRZYWEJ S-N W ZAKRESIE OGRANICZONEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz
** Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej – studia doktoranckie, p.strzelecki@utp.edu.pl

Celem pracy jest weryfikacja analitycznej metody służącej do wyznaczenia krzywej S-N, która szczegółowo została opisana w publikacji [4]. Główne założenia metody bazują na tym, iż w pierwszym kroku należy wyznaczyć rzeczywiste własności statyczne materiału (wytrzymałość na rozciąganie R_m i granicę plastyczności R_e). Kolejnym krokiem jest wyznaczenie równania krzywej S-N wg równań [1, 2 i 3].

$$\sigma_a^{m_e} N = Z_G^{m_e} N_0 \tag{1}$$

$$m_e = \frac{\log\left(\frac{10^6}{N_{Re}}\right)}{log\left(\frac{0{,}9R_e}{Z_G}\right)} \tag{2}$$

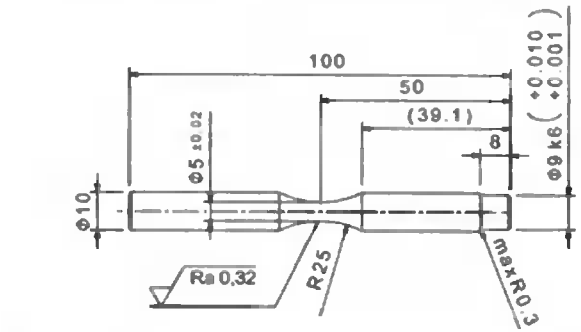
$$\mathrm{N_{Re}} = 400\left(\frac{\mathrm{R_e}}{\mathrm{R_m}}\right)^{-10} \tag{3}$$

gdzie:

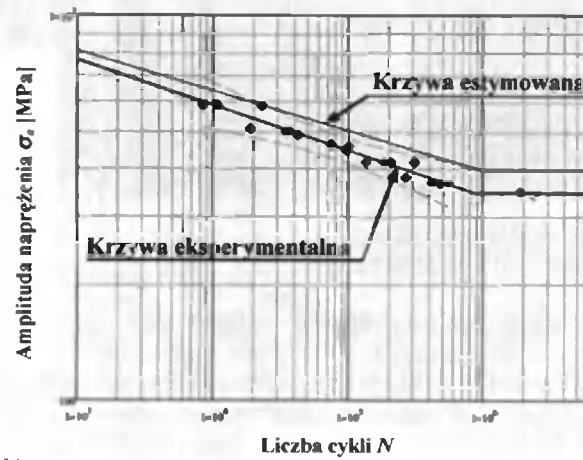
σ_a – amplituda naprężenia,
N – liczba zrealizowanych cykli,
Z_G – granica zmęczenia – wyznaczano wg metody FITNET [za 1],
N_0 – bazowa liczba cykli (założono 10^6),
m_e – wykładnik kierunkowy.

Dla zweryfikowania powyższej metody wykorzystano własności zmęczeniowe materiału C45 +C. Do uzyskania tych danych zostały przeprowadzone badania na stanowisku badawczym służącym do obciążania próbek poprzez obrotowe zginanie. Rysunek próbki użytej do badań został przedstawiona poniżej (rys. 1a). Należy nadmienić, iż maszyna wytrzymałościowa została wykonana wg projektu własnego. Badania zostały przeprowadzone zgodnie z normami [2] i [3]. Uzyskane wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 1b. Dodatkowo na wykresie została zaznaczona estymowana krzywa S-N wg metody przedstawionej powyżej.

W celu weryfikacji proponowanej metody zostały przeprowadzone obliczenia sprawdzające założenia, iż krzywa estymowana jest równoległa do krzywej regresji uzyskanej z otrzymanych wyników badań własnych.



a)



b)

Rys. 1. Rysunek próbki wykorzystanej do badań (a), wyniki badań mat. C45 +C z krzywą estymowaną wg weryfikowanej metody (b)

Przeprowadzone obliczenia potwierdziły założenie, iż krzywa estymowana jest równoległa do krzywej eksperymentalnej. Sposób przeprowadzenia i wyniki obliczeń zostaną przedstawione w pełnym tekście artykułu.

LITERATURA

[1] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J., 2008. Ocena wytrzymałości, trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty. Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
[2] PN-H-04325. 1976. Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzania prób.
[3] PN-H-04326,b1976. Badanie metali na zmęczenie – Próba zginania.
[4] Strzelecki P., Sempruch J., 2011. Modification of selected methods of rapid determination of fatigue characteristics in the range of limited fatigue life. Journal of Polish Cimac 6(3). 289-296.

Praca współfinansowana ze środków Unii Europejskiego w ramach Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz budżetu województwa kujawsko-pomorskiego w ramach projektu: Krok w przyszłość – stypendia dla doktorantów IV edycja.

Grzegorz SZALA, Bogdan LIGAJ

ANALIZA PORÓWNAWCZA METOD OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ STALI C45 W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ O ZMIENNEJ AMPLITUDZIE W ZAKRESIE NISKO I WYSOKOCYKLOWEGO ZMĘCZENIA

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

W pracy [1] sformułowano założenia obliczeń trwałości zmęczeniowej dla zakresów nisko (NCZ) i wysokocyklowego zmęczenia (WCZ) stopów metali. W opisanej metodyce obliczeń wyróżniono 3 ścieżki: 1 – oparta na zastosowaniu pełnego (kompletnego) wykresu Wöhlera (obliczenia w ujęciu naprężeniowym), 2 - wykorzystująca wykres Mansona-Coffina (obliczenia w ujęciu odkształceniowym) oraz 3 – metoda hybrydowa, w której dla zakresu NCZ stosowane są obliczenia trwałości w ujęciu odkształceniowym, natomiast dla zakresu WCZ stosowane są obliczenia trwałości w ujęciu naprężeniowym.

W pracy opisano obliczenia trwałości zmęczeniowej dla próbek wykonanych ze stali C 45 o następujących własnościach mechanicznych: R_m = 682 MPa, R_e = 458 MPa, $E = 2{,}15 \cdot 10^5$ MPa. Wykres Wöhlera dla R = -1,0 wyznaczony doświadczalnie można wyrazić za pomocą wzoru:

$$\log S_a = -0{,}1020 \log N + 2{,}9611 \tag{1}$$

dla którego granica zmęczenia przy $N_0 = 10^6$ wynosi $S_{f(-1)}$ = 223,5 MPa, a wykładniki potęgi $m_{(-1)}$ = 9,8.

Wykres Mansona-Coffina wyznaczony doświadczalnie opisano wzorem:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{1204}{2{,}15 \cdot 10^5} \left(2N_f\right)^{-0{,}1033} + 0{,}2179 \left(2N_f\right)^{-0{,}475} \tag{2}$$

Pomocny w przekształceniu programu obciążeń w ujęciu naprężeniowym na program obciążeń w ujęciu odkształceniowym, wykres Ramberga-Osgooda wyznaczony doświadczalnie przyjmuje postać:

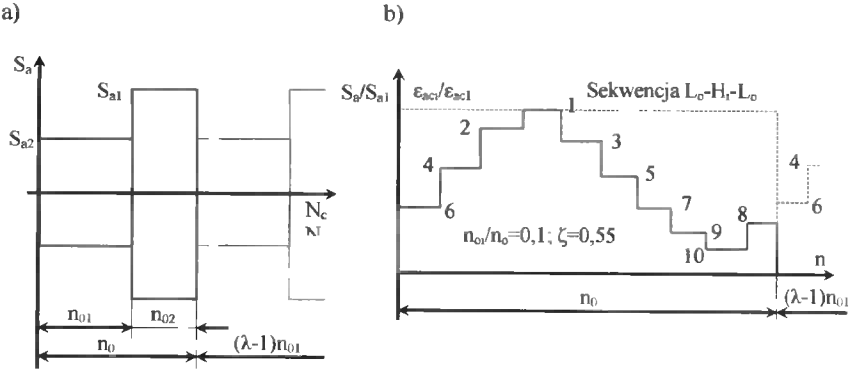
$$\varepsilon_{ac} = \frac{S_a}{2{,}15 \cdot 10^5} + \left(\frac{S_a}{1232}\right)^{5{,}06} \tag{3}$$

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch postaci programów obciążeń: dwustopniowego o zmiennych parametrach oraz wielostopniowego (rys. 1)

W programie dwustopniowym przyjęto następujące parametry:

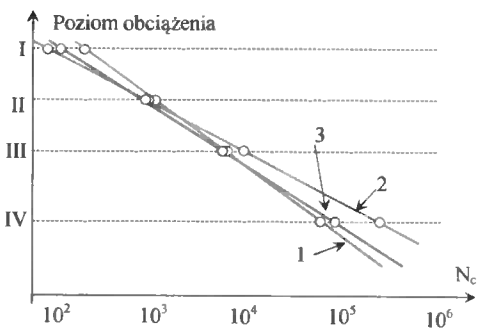
- cztery poziomy maksymalnych naprężeń w programie: S_a = 650, 570, 460 i 340 MPa,
- trzy stosunki wartości naprężeń S_{a2}/S_{a1} = 0,75; 0,5; i 0,25,
- cztery stosunki liczb cykli n_{01}/n_0 = 0,75; 0,5; 0,25 i 0,1.

W programie wielostopniowym przyjęto te same poziomy maksymalnych naprężeń w programie S_{a1}, natomiast wartości naprężeń na poszczególnych stopniach i pojemności cykli na kolejnych stopniach programu przedstawiono na rysunku 1b.



Rys. 1. Schematy programów obciążeń przyjętych do obliczeń: a) program dwustopniowy, b) program wielostopniowy

Szczegółowe wyniki obliczeń przedstawiono w pracy na płycie CD i w prezentacji w trakcie obrad Sympozjum. Dla przykładu na rysunku 2 zamieszczono porównanie wyników obliczeń wg poszczególnych ścieżek.



Rys. 2. Wykresy trwałości zmęczeniowej (Gassnera) dla stali C45 w warunkach obciążeń wielostopniowych wyznaczone w obliczeniach metodami: 1 – wg ujęcia naprężeniowego (ścieżka 1), 2 – wg ujęcia odkształceniowego (ścieżka 2) oraz 3 – wg metody hybrydowej

LITERATURA

[1] Szala J., 2012. Założenia obliczeń trwałości zmęczeniowej dla zakresów nisko i wysokocyklowego zmęczenia stopów metali. Materiały XXIV Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz – Pieczyska.

Praca naukowa sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego własnego nr 2221/B/T02/2010/39.

Grzegorz SZALA, Bogdan LIGAJ

MODYFIKACJA MATEMATYCZNYCH MODELI DWUPARAMETRYCZNYCH CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH OPARTYCH NA KONCEPCJACH WYKRESÓW NAPRĘŻEŃ GRANICZNYCH GOODMANA I HAIGHA

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

Zmienność amplitud i wartości średnich cykli sinusoidalnych w widmie obciążeń wymaga zastosowania, w obliczeniach trwałości zmęczeniowej, odpowiednich charakterystyk zmęczeniowych do opisu własności cyklicznych materiału. Wymienionym warunkom odpowiadają dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe (DChZ): $N(S_a, S_m)$ lub $N(S_{min}, S_{max})$ [1].

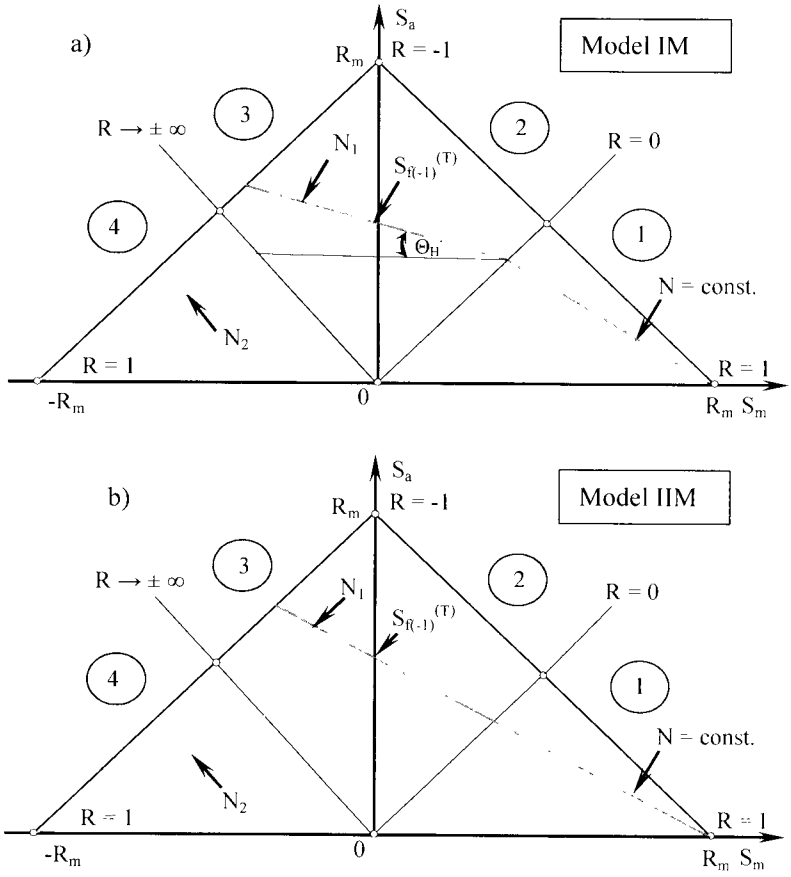
Nieliczny zbiór doświadczalnych DChZ – $N(S_{min}, S_{max})$ stali, stopów aluminium i tytanu znaleźć można w pracy [2]. Pierwsze modele matematyczne DChZ opublikowali Bołotin w 1968 roku i Heywood w roku 1962. Przegląd modeli i wyniki ich eksperymentalnej weryfikacji dla wybranych materiałów opublikowano w pracy [1]. Z pracy tej wynika, że brak, uniwersalnego matematycznego modelu DChZ, który odpowiadałby złożonym warunkom obciążenia i różnym materiałom.

Na zgodność wyników obliczeń według poszczególnych modeli z wynikami badań doświadczalnych istotny wpływ ma rodzaj materiału, poziom obciążenia i wartość współczynnika asymetrii cyklu.

Z analizy danych zawartych w literaturze wynika potrzeba modyfikacji dwóch matematycznych modeli DChZ opartych na koncepcjach wykresów naprężeń granicznych Goodmana i Haigha. Propozycja modyfikacji wymienionych modeli DChZ spełnia w znacznym stopniu warunek uniwersalności (w odniesieniu do rodzaju materiału, poziomu obciążenia i zmienności współczynnika asymetrii cyklu), prostoty modelu (ograniczenie liczby parametrów) i akceptowanej zgodności wyników obliczeń z wynikami badań. Graficzną postać wykresów DChZ według modelu IM opartego na koncepcji wykresu naprężeń granicznych Haigha (w wersji uproszczonej przez Serensena) pokazano na rysunku 1a, natomiast modyfikację matematycznego modelu IIM DChZ wg koncepcji wykresu naprężeń granicznych Goodmana, przedstawiono na rysunku 1b.

W obu przytoczonych przypadkach linie stałych trwałości N = const w obszarach 1 dla $0 < R < 1{,}0$ i 2 dla $-1{,}0 \leq R \leq 0$ przebiegają zgodnie z podstawowymi opisami modeli I i II zamieszczonymi w pracy [1]. W obszarach 3 dla $-\infty < R < -1{,}0$ i 4 dla $1{,}0 < R \leq +\infty$ w zależności od rodzaju materiału linie stałych trwałości przebiegają zgodnie z oznaczeniem N_1 lub N_2 (linie przerywane).

Pełny tekst pracy zamieszczony na płycie CD i wygłoszony w czasie Sympozjum zawiera: szczegółowy opis modeli przedstawionych na rysunku 1 z podaniem odpowiednich wzorów matematycznych, wyniki doświadczalnej weryfikacji analizowanych modeli i analizę porównawczą wymienionych modeli z modelami wcześniej publikowanymi. Badania doświadczalne stanowiące podstawę weryfikacji analizowanych modeli przeprowadzono na stalach: C45, S355J0 i 41Cr4.



Rys. 1. Zmodyfikowane matematyczne modele DChZ: według koncepcji Haigha, b) według koncepcji Goodmana

LITERATURA

[1] Szala G., 2011. Analiza teoretyczna i doświadczalna dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych stali konstrukcyjnych. [W:] Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja. Wyd. ITE – PIB Radom – Bydgoszcz.

[2] Boyer H.E., 2003. Atlas of Fatigue Curves. ASM International. The Materials Information Society.

Praca naukowa sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w ramach projektu badawczego własnego nr 0715/B/T02/2008/35.

Józef SZALA

DWUPARAMETRYCZNE CHARAKTERYSTYKI ZMĘCZENIOWE STALI KONSTRUKCYJNYCH I ICH EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA – CHARAKTERYSTYKA ZBIORU MONOGRAFII

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

Monografia pt.: Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja [1] powstała w wyniku realizacji projektu badawczego własnego 0715/B/T02/2008 o tym samym tytule.

Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych zależna jest od wielu czynników. Podstawowe znaczenie mają cechy konstrukcyjne obiektu, w tym własności cykliczne materiałów oraz obciążenia eksploatacyjne analizowanego obiektu. Obciążenia eksploatacyjne są w ogólności obciążeniami losowymi o szerokim widmie. Stosując znane metody zliczania cykli otrzymuje się w takich przypadkach - widma obciążeń będące zbiorem cykli sinusoidalnych o zmiennych, w szerokich granicach, wartościach średnich i amplitudach.

Charakterowi obciążenia powinny odpowiadać charakterystyki zmęczeniowe, którymi opisuje się własności cykliczne materiałów. W przypadku obciążeń losowych o szerokim widmie są to dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe [1].

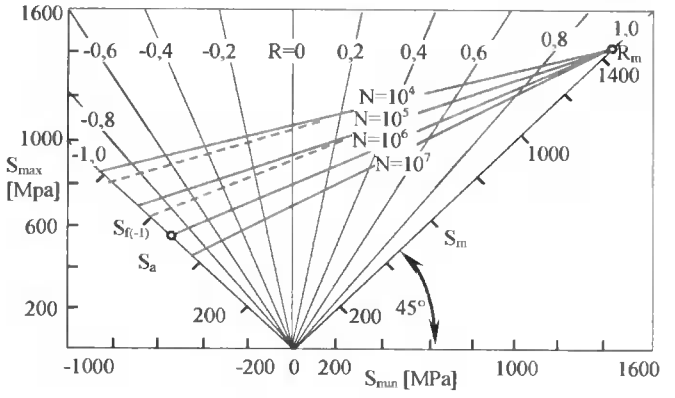
Na rysunku 1 przedstawiono schematy wyznaczonych doświadczalnie dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych.

Doświadczalne wyznaczenie dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych jest czasochłonne i kosztowne. W monografii [1] dokonano analizy literatury z zakresu matematycznych modeli tych charakterystyk i zaproponowano ich modyfikacje (część I monografii autorstwa G. Szali pt.: Analiza teoretyczna i doświadczalna dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych stali konstrukcyjnych).

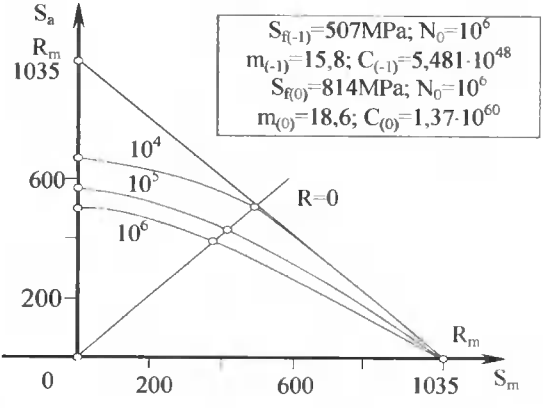
Weryfikacja doświadczalna analizowanych modeli matematycznych wykazała, że stopień zgodności wyników obliczeń z rezultatami badań zależy od przyjętego modelu matematycznego dla poszczególnych stali, od wartości współczynnika asymetrii cyklu R i wartości obciążeń (lub zakresu trwałości). Analiza wyników obliczeń i badań przedstawiona w pracy [1] umożliwia dobór odpowiedniego matematycznego modelu do określonych warunków: gatunku stali i eksploatacyjnego obciążenia.

Część II monografii autorstwa B. Ligaja pt.: Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń szerokowidmowych poświęcona jest zastosowaniu dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych w obliczeniach trwałości zmęczeniowej. Do obliczeń przyjęto obciążenie eksploatacyjne zarejestrowane w układzie jezdnym samochodu osobowego w warunkach zróżnicowanych nawierzchni i wykonywanych manewrów, hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera oraz dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe dla stali C45, S355J0 i 41Cr4 opisane 7 różnymi matematycznymi modelami. Na podstawie analizy porównawczej wyników badań i obliczeń sformułowano wskazania, co do doboru odpowiednich charakterystyk zmęczeniowych.

a)



b)



Rys. 1. Dwuparametryczna charakterystyka zmęczeniowa stali 4340 (wg ASM) [3]: a) w postaci $N(S_{min}, S_{max})$, b) w postaci $N(S_m, S_a)$

Algorytm wymienionych obliczeń przedstawiony został w pracy [1]. Część I i II zbioru monografii stanowią autonomiczne części zawierające ściśle określone zadania.

W pracy omówiono analizowane modele matematyczne i zakresy ich stosowania w obliczeniach zmęczeniowych.

LITERATURA

[1] Szala G., Ligaj B., 2011. Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja. Wyd. ITE – PIB Radom.

Praca naukowa sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w ramach projektu badań własnych nr 0715/B/T02/2008/35.

Józef SZALA

ZAŁOŻENIA OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ DLA ZAKRESÓW NISKO- I WYSOKOCYKLOWEGO ZMĘCZENIA STOPÓW METALI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

Założenia, zgodnie z tytułem pracy, obejmują przypadki obciążeń zmiennoamplitudowych o wartościach obciążeń leżących w zakresach nisko- i wysokocylowego zmęczenia.

W pracy przedstawiono trzy możliwe do zastosowania praktycznego metody obliczeń (ścieżki). Pierwsza w ujęciu naprężeniowym, oparta jest na zastosowaniu wykresu zmęczeniowego (S-N) Wöhlera dla zakresu nisko- i wysokocyklowego zmęczenia (tzw. kompletny wykres Wöhlera). Druga ścieżka obejmuje obliczenia w ujęciu odkształceniowym i oparta jest na zastosowaniu wykresu zmęczeniowego Mansona-Coffina (ε_{ac}-$2N_f$) wyznaczonego także w obu zakresach (NCZ i WCZ). Trzecia ścieżka dotyczy obliczeń metodą hybrydową opartą na zastosowaniu wykresu Mansona-Coffina dla zakresu niskocyklowego zmęczenia (ujęcie odkształceniowe) oraz na zastosowaniu wykresu Wöhlera dla zakresu wysokocyklowego zmęczenia (ujęcie naprężeniowe). Podział na zakresy NCZ i WCZ wymaga przyjęcia odpowiedniego kryterium. W omawianych przypadkach, jako kryterium przyjęto granicę plastyczności R_e wyznaczoną w próbie rozciągania.

Wymienione ścieżki schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Na fragmencie losowych naprężeń (rys.1a) poszczególne ekstrema oznaczono kolejnymi cyframi, nieparzystymi lokalne maksima, parzystymi lokalne minima.

Kolejne lokalne maksimum i następujące po nim minimum tworzą cykl. Z położenia wymienionych lokalnych ekstremów wynika, że cykl 1-2 i 5-6 posiadają amplitudy $S_a < R_e$ leżą w zakresie WCZ, natomiast wartość amplitud cykli 3-4 i 7-8 przekraczają granicę plastyczności $S_a > R_e$ i leżą w zakresie NCZ.

Czynnikiem stałym w obliczeniach trwałości zmęczeniowej według omawianych ścieżek jest hipoteza liniowego sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera (PM). Według niej suma uszkodzenia spowodowana liczbą cykli n_o w okresie programu obciążeń wynosi:

$$D_0 = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_{oi}}{N_i} \text{ lub } D_0 = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_{oi}}{N_{fi}} \tag{1}$$

Pęknięcie zmęczeniowe według hipotezy PM nastąpi dla sumy uszkodzeń D = 1,0.

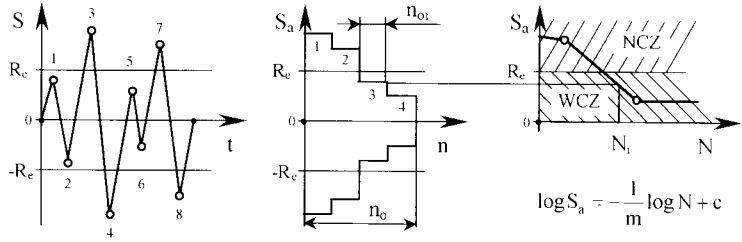
W przypadku obliczeń według ścieżki 3 (metodą hybrydową) oddzielnie sumuje się szkodzenia dla zakresu NCZ i WCZ

$$D_0 = \sum_{i=1}^{p} \frac{n_{oi}}{N_{fi}} + \sum_{i=(p+1)}^{k} \frac{n_{oi}}{N_i} \tag{2}$$

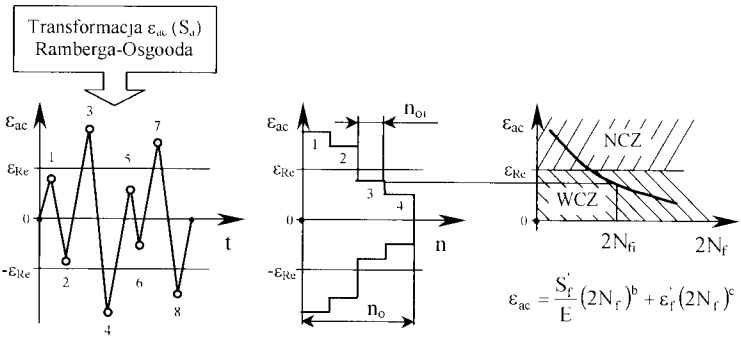
Dla przykładu programów obciążeń przedstawionych na rysunku 1, liczba poziomów k = 4 natomiast liczba poziomów p = 2.

Przykłady obliczeń według opisanych ścieżek zawarto w pracy [1].

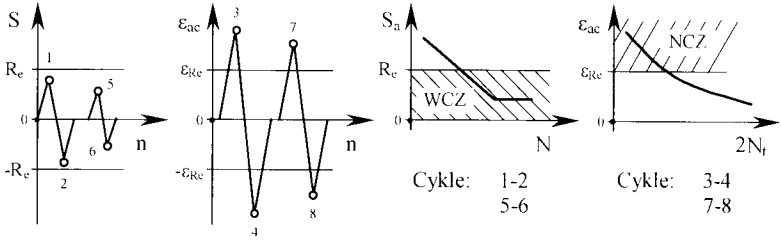
a) ścieżka 1 (ujęcie naprężeniowe)



b) ścieżka 2 (ujęcie odkształceniowe)



c) ścieżka 3 (metoda hybrydowa)



Rys. 1. Schematyczna ilustracja metod obliczeń: a) ścieżka 1 (ujęcie naprężeniowe), b) ścieżka 2 (ujęcie odkształceniowe), c) ścieżka 3 (metoda hybrydowa)

LITERATURA

[1] Szala G., Ligaj B., 2012. Analiza porównawcza metod obliczeń trwałości zmęczeniowej stali C45 w warunkach obciążeń o zmiennej amplitudzie w zakresach NCZ i WCZ. XXIV Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz – Pieczyska.

Praca naukowa sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w ramach projektu badawczego własnego nr 2221/B/T02/2010/39.

Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH

STANOWISKO DO BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH MINIPRÓBKI W WARUNKACH ZMIENNEGO ROZCIĄGANIA

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. WSTĘP

W badaniach trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej materiałów i elementów konstrukcyjnych wykorzystuje się (najczęściej) zmęczeniowe serwo hydrauliczne maszyny sterowne w pętli sprzężenia zwrotnego wymuszenia i pomiaru obciążenia lub odkształcenia [2, 5]. Z uwagi na złożoność podzespołów takiej maszyny (układ sterowania, wymuszenia obciążeń, przetwarzanie sygnałów) oraz dostosowanie gabarytów do próbek normatywnych, koszt ich zakupu lub udostępnienie jest na tyle wysoki, że wyznaczenie charakterystyki zmęczeniowej jest w wielu przypadkach ograniczone ze względów finansowych.

W szeregu prac eksperymentalnych zaobserwować można próby odejścia od wykorzystania wspomnianych maszyn wytrzymałościowych w kierunku uproszczonych stanowisk, jednocześnie z wykorzystywaniem próbek mniejszych niż zalecane w normach, np. [3].

Przykładem mogą być badania zmęczeniowe na minipróbach realizowane dla stali stosowanej w reaktorach jądrowych, które przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej własnej konstrukcji. Weryfikowano wpływ napromieniowania na trwałość zmęczeniową [1]. Krótki przegląd innych zastosowań minipróbek zawiera praca [4].

Uznając celowość takich poszukiwań, w pracy podjęto próbę opracowania mniejszego gabarytowo, prostszego w sterowaniu i w konsekwencji tańszego stanowiska do badania minipróbek.

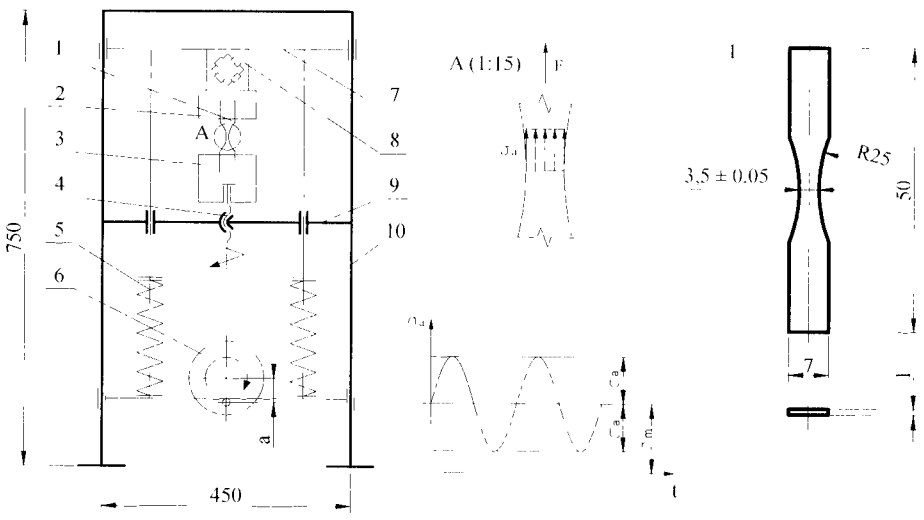
2. KONCEPCJA STANOWISKA

Zadaniem maszyny jest obciążenie cyklem sinusoidalnym odzerowo tętniącym lub jednostronnym minipróbek (wymiary części roboczej mniejsze niż określone w normie [3]). Schemat ideowy stanowiska przedstawiono na rysunku 1. W celu minimalizacji kosztów stanowiska, sterowanie obciążeniem realizowane jest poprzez wymuszenie kinematyczne.

Układ napędzany jest silnikiem elektrycznym trójfazowym, w którym prędkość obrotowa jest regulowana za pomocą falownika. Moc przenoszona jest poprzez przekładnię pasową zębatą. Amplituda obciążenia generowana jest w wyniku zastosowania zmiennego mimośrodu (6), który umożliwia płynną regulację obciążenia (rys. 1a). Mimośród wymusza ugięcie sprężyn naciskowych (5), które oddziaływają na belkę poziomą (7), do której przytwierdzony jest tensometryczny czujnik siły (8) i górny uchwyt próbki (2). Dolny uchwyt (3) związany jest z konstrukcją ramy maszyny (9) poprzez połączenie śruba-nakrętka w celu zmiany wartości naprężenia średniego (σ_m) cyklu obciążenia.

W przypadku realizacji badań z wykorzystaniem minipróbek wykonanych z metalu, maksymalne odkształcenie jest na poziomie około 0,1 mm. W związku z tym, zastosowano przełożenie odkształcenia, które zrealizowano poprzez wprowadzenie do układu dwóch sprężyn naciskowych, osadzonych na trzpieniach, umożliwiających szybką wymianę na elementy o innej sztywności.

Wstępne założenia parametrów stanowiska zakładają wielkość próbki (pole przekroju części roboczej 3÷4 mm^2), gdzie przy maksymalnym przyjętym obciążeniu F = 2000 N, naprężenie maksymalne (σ_{max}) jest równe 500÷630 MPa.



Rys. 1. Schemat kinematyczny stanowiska badawczego: 1 – minipróbka; 2, 3 uchwyt; 4 – mechanizm śrubowy; 5 – sprężyna śrubowa naciskowa; 6 mimośród; 7 – trawers ruchomy; 8 – czujnik tensometryczny; 9 – trawers stały; 10 – rama; a – skok mimośrodu

LITERATURA

[1] Hirose T., Sakasegawa H., Kohyama A., Katoh Y., Tanigawa H., 2000. Effect of specimen size on fatigue properties of reduced activation ferritic martensitic steels. Journal of Nuclear Materials, 283-287.

[2] Lee Y., Pan J., Hathaway R.B., Barkey M.E., 2005. Fatigue testing and analysis. University of Alabama. Elsevier.

[3] PN-74/H-04327. Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania - ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.

[4] Sempruch J., Tomaszewski T., 2011. Application of mini specimens to high-cycle fatigue tests, Journal of Polish Cimac, 279-287.

[5] Stephens R.I., Fatemi A., Stephens R.R., Fuchs H.O., 2001. Metal fatigue in engineering. John Wiley & Sons, Inc.

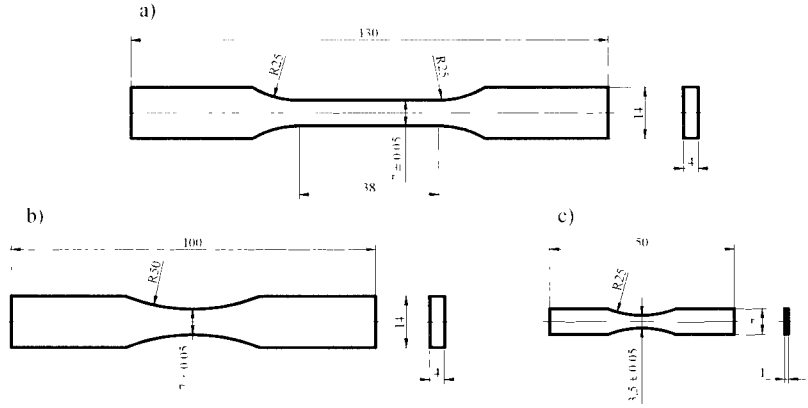
Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH

WYZNACZANIE WŁASNOŚCI ZMĘCZENIOWYCH STOPU ALUMINIUM Z WYKORZYSTANIEM MINIPRÓBKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. PRÓBKI DO BADAŃ

Minipróbka wskazana w tytule pracy, to próbka, której geometria jest definiowana poniżej wymiarów zalecanych do stosowania przez odpowiednie normy [1, 2]. Przykładowe zestawienie wymiarów próbki do badań statycznych, próbki znormalizowanej do badań zmęczeniowych oraz przyjętej w sprawozdawanych badaniach minipróbki przedstawia rysunku 1. Próbki do badań zmęczeniowych charakteryzują się jednakowym współczynnikiem spiętrzenia naprężeń α_k. Badania zrealizowano dla stopu aluminium EN AW-6063 w postaci półfabrykatu wyciskanego o wymiarach uniemożliwiających wykonanie próbki normatywnej.



Rys. 1. Geometria: a) próbki do badań statycznych [3], b) próbki normatywnej do badań zmęczeniowych [1, 2]; c) minipróbki do badań zmęczeniowych

2. HIPOTEZY PRACY

W ramach prowadzonej tematyki badawczej sformułowano hipotezy:

1. Możliwym jest opracowanie, dla wskazanej grupy materiałów konstrukcyjnych, metodyki badań zmęczeniowych realizowanych z wykorzystaniem minipróbki. Przez metodykę prowadzenia badań rozumie się:
   - ustalenie sposobu kształtowania próbki (geometria),
   - ustalenie zakresu możliwych do zastosowania obciążeń,
   - zidentyfikowanie grup materiałów o zróżnicowanej wrażliwości na efekt skali.
2. Przeprowadzenie badań porównawczych (pomiędzy próbką normatywna a minipróbką) pozwoli określić definiowane dla danej grupy materiałów relacje pomiędzy

wielkościami wartości charakteryzujących właściwości zmęczeniowe w obu porównywanych sposobach kształtowania próbki.

3. Istnieje grupa materiałów konstrukcyjnych, dla których wskazane wyżej relacje mają postać uproszczoną (niski poziom wrażliwości na efekt skali), a realizacja badań na minipróbkach wykonanych z tych materiałów jest szczególnie celowa i opłacalna.

3. BADANIA WYSOKOCYKLOWE

Na potrzeby weryfikacji powyższych hipotez opracowano metodykę badań, która obejmowała ustalenie geometrii minipróbki (rys. 1c). Zdefiniowano zakres możliwych do wykorzystania w badaniach obciążeń. Ze względu na wybaczanie się próbek w badaniach rozpoznawczych, w badaniach zasadniczych wykorzystywano obciążenia ze składową średnią rozciągającą z zachowaniem warunku dla współczynnika asymetrii cyklu $R > 0$. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8874. Zidentyfikowano własności monotoniczne materiału poprzez przeprowadzenie statycznej próby rozciągania na podstawie normy [3]. Opierając się na mich, w zakresie wysokocyklowego zmęczenia ($10^4 \div 2x10^6$), określono wstępnie zakres stosowanych poziomów naprężeń. W pierwszym etapie badań zmęczeniowych zrealizowano próby z wykorzystaniem minipróbek (rys. 1c), które obciążano cyklem niesymetrycznym sinusoidalnym o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$. Częstotliwość zmiany obciążenia próbki była równa 5 Hz.

Stopy aluminium wykazują zmiany własności mechanicznych ujawniające się cyklicznym umocnieniem materiału [4]. W badaniach przekładało się to na konieczność stosowania amplitud obciążenia o wartościach maksymalnych przekraczających wytrzymałość na rozciąganie materiału w stanie wyjściowym. Wskazane umocnienie zweryfikowano poprzez badania próbek (stosowanych w badaniach statycznych) obciążonych wstępnie cyklem zmęczeniowym zgodnym ze stosowanym w badaniach podstawowych. Próbę przeprowadzono do momentu ustabilizowania pętli histerezy. Następnie zrealizowano statyczną próbę rozciągania.

Minipróbki wykazały istotne ograniczenia w zakresie stosowanych obciążeń i problemy technologiczne związane z ich wykonaniem. Mimo tego, wykorzystanie minipróbek w badaniach umożliwiło wyznaczenie, w wybranym zakresie, charakterystyki zmęczeniowej.

LITERATURA

[1] PN-74/H-04327. Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania – ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.

[2] PN-EN 3987, 2010. Lotnictwo i kosmonautyka - Metody badań materiałów metalowych – Próba zmęczeniowa o dużej liczbie cykli ze stałą amplitudą kontrolowanego obciążenia.

[3] PN-EN ISO 6892-1, 2010. Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.

[4] Szala J., 1998. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, Wyd. Uczeln. ATR, Bydgoszcz.

**Tomasz TOPOLIŃSKI, Artur CICHAŃSKI,
Adam MAZURKIEWICZ, Krzysztof NOWICKI**

O PEWNEJ METODZIE WYZNACZANIA WARTOŚCI MODUŁU STYCZNEGO W BADANIACH ZMĘCZENIOWYCH KOŚCI BELECZKOWEJ

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

W badaniach zmęczeniowych kości wykorzystywane są hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, które wymagają określenia parametru uszkodzenia. Najczęściej parametr uszkodzenia jest definiowany w formie $D = E/E_0$, gdzie E jest bieżącą wartości modułu stycznego, a E_0 jego wartością początkową [1,2], w tej samej konwencji utrzymywana jest również zależność $D = 1 - E/E_0$ z pracy [3]. W literaturze znajdują się również inne opisy parametru uszkodzenia, np. $D = AD/A$, gdzie AD jest bieżącym polem powierzchni uszkodzenia, natomiast A początkowym polem powierzchni uszkodzenia [1]. Podobna zależność jest również zdefiniowana dla objętości $D = DV/BV$, gdzie DV jest uszkodzoną objętością, BV początkową objętością nieuszkodzoną [3]. Praca [4] podaje inną formę funkcji uszkodzenia wyprowadzoną z liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych:

$$D(u) = n\frac{L}{F} \times \sigma(M + B) \tag{1}$$

gdzie: L, F, M, B stałe wyznaczane eksperymentalnie.

We wszystkich tych zależnościach uwidacznia się zastosowanie pewnego czynnika standaryzującego (np. modułu E_0). Jego istotą jest ujęcie w zależnościach zmęczeniowych złożoności struktur kostnych i naturalnego rozrzutu własności materiału biologicznego.

Wartości początkowego modułu stycznego wyznaczane są z wykorzystaniem różnorakich metod, które zostaną pokrótce opisane. W pracy [3] moduł ten jest zdefiniowany jako maksymalne nachylenie linii regresji wyznaczonej dla 11 przedziałów pętli histerezy w układzie odkształcenie – naprężenie w przyjętym przedziale odkształceń mieszczącym się w zakresie od 0,1% i 0,8%. Moduł styczny w pracy [5] został określony przed właściwym badaniem zmęczeniowym poprzez obciążenie próbki siłą ściskającą 100N (wywołującą naprężenie 10 MPa), a następnie odciążenie w czasie 0,5 s. W pracy [6] można znaleźć metodę określania początkowego modułu stycznego, który jest wyznaczany jako nachylenie linii najlepszego dopasowania do kształtu ostatniej pętli histerezy wstępnego bloku obciążenia zmęczeniowego dla zakresu odkształceń od 0.001 do 0.003. Początkowy moduł styczny prezentowany w pracy [7] jest obliczany jako nachylenie linii najlepszego dopasowania do 10 cyklu zmęczeniowego dla zakresu odkształceń od 0,1% do 0,3%. Próbki były początkowo 20-krotnie obciążane z częstotliwością 2 Hz siłą 100 N (naprężenie maksymalne w próbce około 12 MPa) [4]. W teście tym uzyskiwany kształt krzywej odkształcenie – naprężenie zbliżony był do liniowego, dlatego jako początkowego modułu stycznego wykorzystywano nachylenie tak uzyskanej linii.

W naszych pracach wykorzystano ustandaryzowane opisy własności zmęczeniowych, w których czynnikiem standaryzującym jest pewien początkowy moduł E_0. W zależności od wymagań i celu prowadzonych badań czynnik standaryzujący może być modułem stycznym lub siecznym pętli histerezy. Dla nieopisanych w tej pracy badań nad zastosowaniem liniowych hipotez zmęczeniowych do wyznaczania krzywej S-N dla próbek kości ludzkiej, konieczne było opracowanie metody określanie początkowego modułu stycznego. W publikacji tej prezentowane są wyniki obliczeń tego modułu prowadzone według metody opracowanej specjalnie dla badań zmęczeniowych ze stopniowo narastającym obciążeniem. W metodzie tej wartość początkowego modułu stycznego E_0 zdefiniowano jako linię najlepszego dopasowania do zarejestrowanych punktów znajdujących się na górnej gałęzi pętli histerezy w przedziale naprężeń mieszczącym się w zakresie od 85% do 100% maksymalnego naprężenia ściskającego. Moduł styczny w tej metodzie jest wyznaczany dla wszystkich zarejestrowanych pętli histerezy. Jako czynnik standaryzujący wykorzystywana jest wartość średnią obliczonych wartości.

W pracy wyznaczono początkowe moduły styczne dla 61 cylindrycznych próbek kości o średnicy 10 mm i długości 8,5 mm uzyskanych z szyjki głowy kości udowej w trakcie zabiegu aloplastyki stawu biodrowego. Badania zmęczeniowe próbek przeprowadzono w próbie cyklicznego ściskania ze stopniowo narastającym obciążeniem (blokowo) przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 8874

LITERATURA

[1] Kosmopoulos V., Keller T.S., 2008. Predicting trabecular bone microdamage initiation and accumulation using a non-linear perfect damage model. Medical Engineering and Physics. 30, 725-732

[2] Rapillard L., Charlebois M., Zysset P.K., 2006. Compressive fatigue behavior of human vertebral trabecular bone, Journal of Biomechanics 39(11), 2133-2139

[3] Tang S.Y., Vashishth D., 2007. A non-invasive in vitro technique for the three-dimensional quantification of microdamage in trabecular bone. Bone 40, 1259-1264

[4] Haddock S.M., Yeh O.C., Mummaneni P.V., Rosenberg W.S., Keaveny T.M., 2004. Similarity in the fatigue behavior of trabecular bone across site and species. J. of Biomechanics 37(2), 181-187.

[5] Michel M.C., Guo X.E., Gibson L.J., McMahon T.A., Hayes W.C., 1993. Compressive fatigue behavior of bovine trabecular bone. J. Biomechanics 26(4/5), 453-463.

[6] Pattin C.A., Caler W.E., Carter D.R., 1996. Cyclic mechanical property degradation during fatigue loading of cortical bone, J. of Biomechanics 29(1), 69-79.

[7] Moore T.L., Gibson L.J., 2003. Fatigue of Bovine Trabecular Bone. Journal of Biomechanical Engineering 125, 761-768.

**Tomasz TOPOLIŃSKI, Artur CICHAŃSKI,
Adam MAZURKIEWICZ, Krzysztof NOWICKI**

ZASTOSOWANIE OBCIĄŻEŃ STOPNIOWO NARASTAJĄCYCH DO WYZNACZANIA KRZYWYCH S-N KOŚCI BELECZKOWEJ Z WYKORZYSTANIEM LINIOWYCH HIPOTEZ KUMULACJI USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

Badanie własności materiałowych kości jest podstawą wielu procedur medycznych. Istotną rolę wśród tych badań zajmuje określanie reakcji kości na obciążenia fizjologiczne, czyli badania zmęczeniowe. Najistotniejszym problemem, na który napotykają prowadzący, prace badawcze tego rodzaju jest oszacowanie badanej cechy z wykorzystaniem niewielkiej liczby próbek (czasami w oparciu o pojedynczą próbkę, podobnie jak to zaprezentowano w pracach [1, 2]). Celem autorów jest przedstawienie metody wyznaczania krzywej S-N (Wöhlera) opierając się na hipotezie kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera (i jej modyfikacjach), danych literaturowych oraz pojedynczej próbce kości [3,4].

W pracy wykorzystano wyniki badań 61 cylindrycznych próbek kości o średnicy 10 mm i długości 8,5 mm uzyskanych z szyjki głowy kości udowej w trakcie zabiegu aloplastyki stawu biodrowego. Badania zmęczeniowe próbek przeprowadzono w próbie cyklicznego ściskania ze stopniowo narastającym obciążeniem (blokowo) przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 8874. Minimalne obciążenie dla wszystkich poziomów obciążenia wynosiło 5 N. Obciążenie maksymalne dla pierwszego bloku wynosiło 10 N i wzrastało o 10 N w każdym kolejnym bloku. Pojedynczy blok obciążenia składał się z 500 cykli realizowanych ze stałą amplitudą obciążenia i częstotliwością 1 Hz.

Jako podstawę obliczeń przyjęto liniową hipotezę kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych.
W drugim przypadku, przyjęto możliwość zmian wartości parametru uszkodzenia:

$$\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{n}{N}\right) = D \tag{1}$$

gdzie: k jest liczbą wykonanych poziomach obciążenia, D – parametrem uszkodzenia.

Trwałość zmęczeniowa N wyznaczania jest z zależności:

$$\sigma / E_0 = aN^b \tag{2}$$

gdzie: σ to naprężenie maksymalne, a punkt przecięcia wykresu S-N z osią y, b jest współczynnikiem nachylenia krzywej S-N w logarytmicznym układzie współrzędnych, E_0 stanowi początkową wartość modułu stycznego pętli histerezy [5].

Przyjęta w pracy metoda wyznaczania krzywej S-N wymaga wyznaczania trwałości zmęczeniowej N w równaniu 1 na podstawie równania 2:

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n}{\left(\frac{\sigma}{aE_0}\right)^{\frac{1}{b}}} = D \tag{3}$$

Opierając się na równaniu (3), dla założonych wartości D i wyznaczonych w trakcie eksperymentu wartości naprężeń σ, obliczono wartości współczynników a lub b. W przypadku pierwszym wykorzystując dane literaturowe przyjmowano stałą wartość współczynnika b, a obliczano wartość współczynnika a. W przypadku drugim odwracano to założenie (stałe a, obliczane b). Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Średnie wartości współczynników krzywej S-N b i a wyznaczone dla trzech różnych stałych wartości a i jednej stałej wartości b oraz czterech różnych wartości D

	D = 0,5	D = 1	D = 2	D = 10
a = const.		b		
0,0098	-0,0509	-0,0558	-0,0617	-0,0810
0,0121	-0,0644	-0,0704	-0,0775	-0,1007
0,0241	-0,1002	-0,1088	-0,1189	-0,1511
	D = 0,5	D = 1	D =2	D = 10
b = const.		a		
-0,1094	0,0420	0,0389	0,0361	0,03026

Wartości średnie parametrów krzywych S-N uzyskanych opracowaną metodą dla pojedynczej próbki ludzkiej kości beleczkowej oraz parametry krzywych zmęczeniowych wyznaczanych metodami normatywnymi wykazują wysoką zgodność ze współczynnikiem determinacji dochodzącym nawet do wartości 0,95. Najwyższa zgodności wyników obliczeń z dostępnymi danymi eksperymentalnymi osiągana jest dla wartości parametru uszkodzenia D równego 10.

LITERATURA

[1] Landgraf R.W., Morrow J., Endo T., 1969. Determination of the cyclic stress-strain curve. J. of Materials 4, 1621-1653
[2] Palmgren A.Z., 1924. Die Lebendauer von Kugellagern. Zeichscrift des Verein. Deutscher Ingenieure 68, 339-341.
[3] Miner M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. J. Applied. Mechanics 12: A159-A164.
[4] Haddock S.M., Yeh O.C., Mummaneni P.V., Rosenberg W.S., Keaveny T.M., 2004. Similarity in the fatigue behavior of trabecular bone across site and species. J. of Biomechanics 37(2), 181-187.

Krzysztof WERNER*, Włodzimierz BARANOWSKI**

ANALIZA MOŻLIWOŚCI SZYBKIEJ PROPAGACJI PĘKNIĘĆ W RURACH Z POLIETYLENU Z WADAMI

* Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa,
ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa
** Politechnika Częstochowska Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki,
ul. Armii Krajowej 19 C, 42-200 Częstochowa

1. WPROWADZENIE

W rurach z polietylenu o dużej gęstości PE-100 stosowanych na rurociągi do gazu i wody mogą występować różnego rodzaju wady – nieciągłości materiału, np. szczeliny wzdłużne zewnętrzne i wewnętrzne [1]. Mogą one powstawać w procesie wytłaczania rur, np. przy niewłaściwym doborze parametrów technologicznych. Uszkodzenia rur (szczeliny) mogą też powstać podczas ich transportu, składowania i montażu. Szczelina, powodując znaczne spiętrzenie naprężenia wywołanego ciśnieniem przesyłanego medium, może być przyczyną szybkiej propagacji pęknięcia rury [2, 3, 4] (RCP – *Rapid Crack Propagation*) z prędkością równą prędkości dźwięku. Narażone są na to zwłaszcza rury o dużej grubości ścianki z wadami w niskich temperaturach z uwagi na większą kruchość tworzywa. Natomiast w temperaturze pokojowej lub nieco wyższej tworzywa polimerowe wykazują silniej objawy pełzania, powodującego zmniejszanie się modułu Younga E wraz z upływem czasu działania obciążenia. W wyniku tego maleje ich odporność na pękanie K_c [2, 4]. Stąd skłonność do wystąpienia RCP rury polimerowej z wadą z upływem czasu działania obciążenia będzie wzrastała i to tym szybciej, w im wyższej temperaturze jest ona eksploatowana.

2. PĘKANIE RURY POLIETYLENOWEJ ZE SZCZELINĄ

W pracy analizowano wpływ szczelin wzdłużnych i poprzecznych w ściance rury z polietylenu PE-100 o własnościach wyznaczonych na próbkach pobranych z rury [5] (granica plast. σ_y = 21,0 MPa (ε = 1%), E = 600 MPa, K_c = 2,391 MPa·m$^{1/2}$) na możliwość wystąpienia RCP. Rozpatrywano rurę o średnicy zewnętrznej D_z = 110 mm i grubości ścianki e = 6,25 mm (D_z/e = 17.6). Odporność na pękanie K_{cl} po 10 tys. godzin działania obciążenia w temp. 23°C, tj. po spadku modułu E do E_l = 132 MPa na skutek pełzania [4], wyznaczono na podstawie założenia modelu Dugdale'a strefy plastycznej i stałego rozwarcia czoła pęknięcia $\delta = K_c^2/(E\sigma_y)$ w II etapie powolnego wzrostu szczeliny [2] jako:

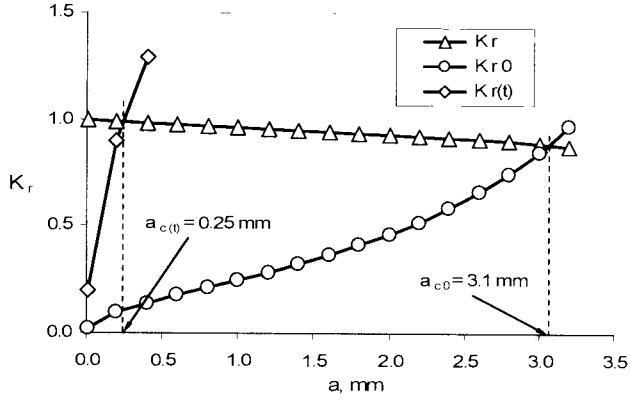
$$K_{cl} = K_c (E_l / E) \tag{1}$$

Dla ścianki rury bez szczeliny wyznaczono nominalne naprężenie obwodowe σ_o i wzdłużne σ_w przy ciśnieniu wewnętrznym: p_w = 0,5 MPa dla gazu i p_w = 1,0 MPa dla wody oraz przy jego maksymalnej wartości w próbie szczelności (p_w = 0,75 MPa dla gazu i p_w = 1,6 MPa dla wody) [6]. Naprężenie σ_o według zależności Lame'go wzrasta nieznacznie liniowo do największej wartości na wewnętrznej powierzchni rury.

Analizę pękania rury ze szczelną o wymiarze charakterystycznym a oparto na europejskiej procedurze obliczeniowej FITNET i metodzie wykresu zniszczenia FAD [7]. Krzywa $K_r = f(L_r)$ tego wykresu obowiązująca do $L_r = L_r^{max}$ przy założonym obciążeniu ogranicza bezpieczny obszar punktu (elementu z wadą) o współrzędnych $K_r = K_a/K_c$ oraz $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_y$. Współczynnik intensywności naprężenia K_a i naprężenie odniesienia σ_{ref} wyznaczono dla naprężenia nominalnego w rurze. Dla pierwszego poziomu analizy (znana jest tylko σ_y; $L_r \leq 1$) równanie krzywej $K_r = f(L_r)$ ma postać:

$$K_r = f(L_r) = \left(1 + 0{,}5L_r^{\,2}\right)^{-0.5}\left[0{,}3 + 0{,}7\exp\left(\min(0{,}001\frac{E}{\sigma_y};0{,}6)L_r^{\,6}\right)\right] \qquad (2)$$

W wyniku przeprowadzonej analizy sporządzono wykresy ilustrujące możliwość wystąpienia RCP przy wzroście wymiaru szczeliny a do wartości krytycznej a_c (rys. 1). Wyniki obliczeń wykazały znaczny wpływ pełzania na krytyczne wymiary szczelin.



Rys. 1. Krzywe zniszczenia rury ze szczeliną wzdłużną o głębokości a: $Kr0$ a w chwili obciążenia, $Kr(t)$ – po 10000 godz. w temp. 23°C dla p_w = 0.5 MPa ($L_r < 0{,}75$)

LITERATURA

[1] Sikora R., 2006. Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych. Wyd. Politechniki Lubelskiej.
[2] Wilczyński A., 1984. Mechanika polimerów w praktyce konstrukcyjnej. WNT Warszawa.
[3] Pusz A., 2002. Gazociągi z tworzyw sztucznych. Monografie, Gazownictwo 2. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej.
[4] Bessonov M.I., Kuvšinskij E.V. 1961. Ob osobennostjach rasvitija treščin w tverdych polimerach, Fiz. Tverd. Tel., 607-610.
[5] Grellmann W., Seidler S. (Eds.), 2007. Polymer Testing, Publ. Carl Hanser Verlag Münich.
[6] Frącz W., Krywult B., 2005. „Projektowanie i wytwarzanie elementów z tworzyw sztucznych", Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
[7] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J., 2008. Ocena wytrzymałości trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.

Mateusz WIRWICKI, Tomasz TOPOLIŃSKI

BADANIA STATYCZNE I ZMĘCZENIOWE PRÓBEK ZĘBINY I POŁĄCZEŃ ZĘBINY Z WYPEŁNIACZAMI

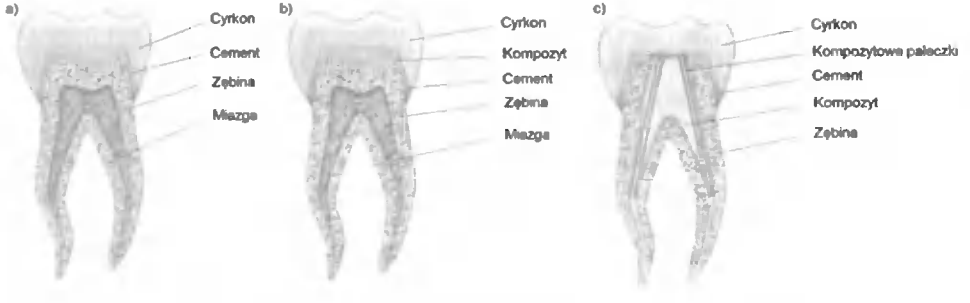
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

1. WSTĘP

Głównym problemem współczesnych połączeń klejowych ząb-wypełniacz (kompozyt), ząb-cyrkon jest ograniczona trwałość *in vivo*. W trakcie badań klinicznych okazuje się, że skuteczność połączenia dwóch powierzchni jest bardzo niska, mimo iż zwykle producent potwierdza bardzo dużą siłę adhezji. Podstawowym mechanizmem wiązania wypełniacza lub cyrkonu jest proces zamiany minerałów z twardych tkanek zęba z monomerami żywicy, które są mikromechanicznie blokowane w utworzonych porowatych powierzchniach.

2. PRÓBKI DO ANALIZY WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ ZĘBÓW WYPEŁNIONYCH I ODBUDOWANYCH

Zdecydowanie większość badań klinicznych *in vitro* zostaje przeprowadzona na zdrowych specjalnie wyselekcjonowanych zębach. W praktyce dentystycznej jest to mały odsetek, kiedy montuje się na zdrowym zębie koronę lub most, nie jest możliwe wówczas dokonanie wypełnienia kompozytowego. Przeważnie są to zabiegi, które odbywają się na zębach, których korony musiano odbudować (rys. 1a), już z wcześniejszymi wypełnieniami (rys. 1b) lub martwych po endodoncji (leczeniu kanałowym) – rysunek 1c.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zęba w przekroju z: a) doklejoną koroną cyrkonową, b) wypełnieniem ubytków, c) po leczeniu kanałowym

3. METODYKA BADAŃ ZMĘCZNIOWYCH

Przegląd literaturowy pozwolił wyłonić badania dynamiczne niskocyklowe jako istotne z punktu widzenia określenia trwałości i wytrzymałości połączenia klejowego.

Wybierając niektóre współczesne kleje oraz żywice modyfikowane, próbki przy 10^4 cykli ulegają zniszczeniu. W pracy zostanie przybliżona metodyka badań zmęczeniowych. Badania zostały przeprowadzone dla próbek sklejonych klejem OptiBond FL. Próbki były badane, aż do zniszczenia lub osiągnięcia 10^4 cykli. Podczas badań uwzględniono również sposób przechowywania próbek. Badanie próbki zostały umieszczone w maszynie wytrzymałościowej INSTRON i poddane rozciąganiu 500N, gdzie przemieszczenie górnych szczęk wynosi 1 mm/min. Badania podzielono na dwie grupy statycznego rozciągania oraz dynamiczne-cykliczne obciążenie próbek, które zostało przeprowadzone dla częstotliwości 2 i 10 Hz.

4. PODSUMOWANIE

W pracy poruszone zostały problemy związane z przygotowaniem próbek zębnych o określonych gabarytach oraz przedstawienie metodyki badań zmęczeniowych. Związane jest to przede wszystkim z budową anatomiczną zęba – jamą miazgi zębowej. Obszarem działania są trzy grupy próbek zębnych, w których występuje połączenie wielowarstwowe ząb-kompozyt, ząb-cement-cyrkon lub kompozyt-cement-cyrkon. Badania mają na celu określenie, w którym miejscu przy tak złożonym połączeniu wielowarstwowym następuje zniszczenie wiązania klejowego. Wyniki przeprowadzonych badań mają uświadomić lekarzom stomatologom, na co muszą zwrócić szczególną uwagę i jakich materiałów mają używać przy montażu korony lub wypełnienia w jamie ustnej pacjenta.

LITERATURA

[1] Kokubo Y., Tsumita M., Kano T., Fukushima S., 2011. The influence of zirconia doping design on the fracture load of all-ceramic molar crowns. Dental Materials Journal 30(3), 281--285.

[2] De Munck J., Van Landuyt K., Peumans M., Poitevin A., Lambrechts P., Braem M.,. Van Meerbeek B., 2005. A Critical Review of the Durability of Adhesion to Tooth Tissue: Methods and Results. Journal of Dental Research 84, 118-133.

[3] Poitevin A., De Munck J., Cardoso M. V., Mine A., Peumans M., Lambrechts P., Van Meerbeek B., 2010. Dynamic versus static bond-strength testing of adhesive interfaces. Dental Matherials 26, 1068-1076.

[4] Drummond J.L., 2008. Degradation, fatigue and failure of resin dental composite materials, J. Dent. Res. 87(8), 710-719.

Tadeusz Z. WOŹNIAK*, Jerzy JELEŃKOWSKI, Krzysztof ROŻNIATOWSKI*****

WPŁYW MIKROSTRUKTURY NA ZMĘCZENIE TOCZNE ŁOŻYSK

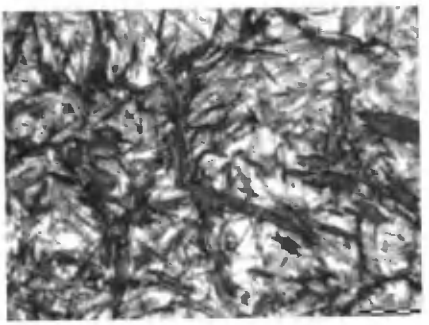
* Wyższa Szkoła Gospodarki w Bydgoszczy, Instytut Informatyki i Mechatroniki,
ul. Garbary 2, 85-229 Bydgoszcz.
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Instytut Techniki,
ul. Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz
** Instytut Mechaniki Precyzyjnej,
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
*** Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej,
ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

1. WSTĘP

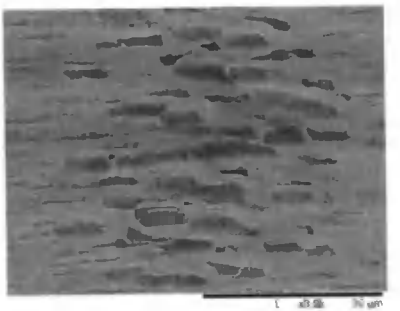
Łożyska toczne należą do bardzo ważnych części maszyn. Głównymi przyczynami destrukcji węzłów tarcia są zacieranie i pitting [1]. Trwałość eksploatacyjna łożysk zależy w dużym stopniu od obróbki cieplnej. W pracy zaproponowano obróbkę cieplną kontrolowaną metodą emisji akustycznej [2, 3]. Umożliwiło to otrzymanie mikrostruktury z rozmieszczeniem twardych cząstek w postaci skupisk o złożonej dyspersji w osnowie bainityczno-martenzytycznej. Do badań zastosowano stal 100CrMnSi6-4. Próbki austenityzowano przy 950°C przez 0,5 h i hartowano w gorącym oleju utrzymując stałą temperaturę (30-180°C). Badanie efektów EA przeprowadzono w trakcie hartowania z przemianą izotermiczną. Miernikiem odporności na pitting była liczba cykli do chwili powstania pierwszych wykruszeń. Geometrię powierzchni wałków po testach obrazowano przy wykorzystaniu: profilometrii interferencyjnej laserowej za pomocą urządzenia WYKO 9300 firmy Veeco i mikroskopu skaningowego.

2. WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że optymalna mikrostruktura zapewniająca najlepsze własności eksploatacyjne badanej stali łożyskowej związana jest z tworzeniem bainitu dolnego z *midribem* w temperaturach niższych od M_S (rys. 1a). Wyniki badań wytrzymałości stykowej przedstawiono jako udział populacji w %, dotyczącej liczby cykli powyżej granicy eksperymentu 20x 10^6 cykli, dla każdego wariantu obróbki cieplnej (rys. 2a). Największy udział populacji sięgający aż 83% otrzymano przy temperaturze hartowania izotermicznego 160°C przez 3 min, a więc na granicy zbliżonej do temperatury M_S. Intensywne i zmienne obciążenie może wygenerować złomy zmęczeniowe – pitting, z charakterystycznymi wydłużonymi pasemkami o szerokości i głębokości kilku mikrometrów (rys. 1b, 2b). Największa trwałość występuje w przypadku inicjacji pittingu na powierzchni (rys. 1b). Przy inicjacji pittingu pod powierzchnią trwałość eksploatacyjna elementów łożysk jest niższa. Pierwsze pęknięcia materiału pojawiają się najczęściej na pewnej głębokości pod powierzchnią w pobliżu tzw. punktu Bielajewa [4].

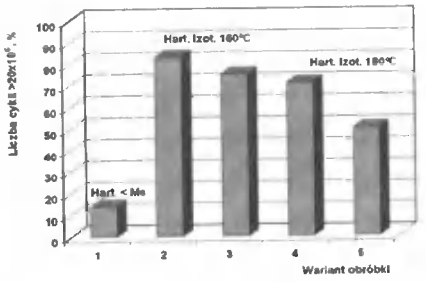


a)

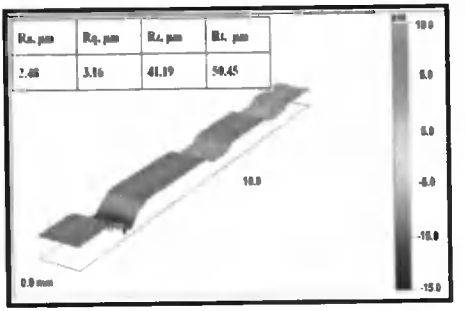


b)

Rys. 1. Płytki bainitu dolnego z *midribem* po hartowaniu z przemianą izotermiczną przy temperaturze 160°C (a), przykład zużycia tocznego: wykruszenie z umocnionej warstwy wierzchniej przy udziale naprężeń ścinających (b)



a)



b)

Rys. 2. Udział populacji w % dotyczącej liczby cykli powyżej granicy eksperymentu $20x10^6$ cykli w zależności od wariantu obróbki cieplnej: 1) hartowanie zwykłe, 2) 160°C przez 3 min., 3) 160°C przez 60 min., 4) 180°C przez 3 min., 5) 180°C przez 10 min. (a), obraz z profilometrii interferencyjnej laserowej (b)

3. WNIOSKI

Wykazano, że jednym z czynników zmniejszających niekorzystny wpływ pasmowości węglików pierwotnych na wytrzymałość stykową stali łożyskowej 100CrMnSi6-4 może być odpowiednio dobrana obróbka cieplna łagodząca niekorzystny wpływ niejednorodności w rozmieszczeniu węglików w strukturze martenzytycznej, co w końcowym efekcie zwiększyło znacząco odporność na zmęczenie stykowe badanej stali powyżej 20 mln cykli obciążenia.

LITERATURA

[1] Pytko S., 1989. Podstawy tribologii i techniki smarowniczej. Skrypty uczelniane AGH 1164.
[2] Woźniak T.Z., Rozniatowski K., Ranachowski Z., 2011. Acoustic Emission in Bearing Steel during Isothermal Formation of Midrib. Metals and Materials International 17(3), 365-373.
[3] Woźniak T.Z., Rozniatowski K., Ranachowski Z., 2011. Application of Acoustic Emission to Monitor Bainitic and Martensitic Transformation. Metallic Materials - Kovove Materialy 49(5), 319-331.
[4] Luty W., 1969. Stale łożyskowe. WNT Warszawa.

Politechnika Technologiczno-Przyrodnicza BIBLIOTEKA GŁÓWNA

LISTA UCZESTNIKÓW XXIV SYMPOZJUM ZMĘCZENIE I MECHANIKA PĘKANIA

Tytuł	Imię	Nazwisko	Uczelnia	Wydział	E-mail
mgr inż.	Łukasz	Blacha	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	l.blacha@doktorant.po.opole.pl
dr hab. inż.	Zdzisław	Bogdanowicz	Wojskowa Akademia Techniczna	Mechaniczny	zbogdanowicz@wat.edu.pl
mgr inż.	Michał	Böhm	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	m.bohm@doktorant.po.opole.pl
dr hab. inż., prof. nadzw. UTP	Dariusz	Boroński	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej, Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn	dariusz.boronski@utp.edu.pl
dr inż.	Artur	Cichański	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	arci@utp.edu.pl
dr	Ihor	Dzioba	Politechnika Świętokrzyska	Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn	pkmid@tu.kielce.pl
mgr inż.	Elżbieta	Gadalińska	Instytut Lotnictwa	Net Instytut	elzbieta.gadalinska@ilot.edu.pl
dr inż.	Jarosław	Gałkiewicz	Politechnika Świętokrzyska	Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn	jgalka@tu.kielce.pl
mgr inż.	Piotr	Garbacz	Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy	Zakład Mechatroniki	piotr.garbacz@itee.radom.pl
dr inż.	Tomasz	Giesko	Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy	Zakład Mechatroniki	tomasz.giesko@itee.radom.pl
mgr inż.	Gabriel	Gmurczyk	Wojskowa Akademia Techniczna	Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych	gabriel.gmurczyk@itwl.pl
dr inż.	Grzegorz	Golański	Politechnika Częstochowska	Instytut Inżynierii Materiałowej	grisza@wip.pcz.pl
prof. dr hab. inż.	Czesław	Goss	Wojskowa Akademia Techniczna	Mechaniczny	cgoss@wat.edu.pl
mgr inż.	Zbigniew	Górski	Politechnika Gdańska	Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa	zgorski@pg.gda.pl
dr inż.	Marcin	Graba	Politechnika Świętokrzyska w Kielcach	Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn	mgraba@tu.kielce.pl
dr inż.	Krzysztof	Grzelak	Wojskowa Akademia Techniczna	Mechaniczny	kgrzelak@wat.edu.pl
dr inż.	Volodymyr	Hutsaylyuk	Wojskowa Akademia Techniczna	Wydział Mechaniczny	vhutsaylyuk@wat.edu.pl
dr inż.	Jacek	Jackiewicz	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	jacek.jackiewicz@utp.edu.pl

Tytul	Imię	Nazwisko	Uczelnia	Wydział	E-mail
dr hab. inż.	Mieczysław	Jaroniek	Politechnika Łódzka	Wydz. Mechaniczny	mieczyslaw.jaroniek@p.lodz.pl
dr inż.	Grzegorz	Junak	Politechnika Śląska	Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii	grzegorz.junak@polsl.pl
dr inż.	Jerzy	Kaniowski	Instytut Lotnictwa	NET	jerzy.kaniowski@ilot.edu.pl
dr inż.	Waldemar	Karaszewski	Politechnika Gdańska	Wydział Mechaniczny	w.karaszewski@wp.pl
dr hab. inż.	Aleksander	Karolczuk	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	a.karolczuk@po.opole.pl
prof. dr hab.	Dorota	Kocańda	Wojskowa akademia Techniczna	Mechaniczny	dkocanda@wat.edu.pl
mgr inż.	Jakub	Kowalski	Politechnika Gdańska	Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa	jakkowal1@pg.gda.pl
dr hab. inż.	Janusz	Kozak	Politechnika Gdańska	Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa	kozak@pg.gda.pl
mgr inż.	Andrzej	Kurek	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	a.kurek@doktorant.po.edu.pl
mgr inż.	Marta	Kurek	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	m.kurek@doktorant.po.edu.pl
dr inż.	Cyprian	Lachowicz	Politechnika Opolska	Mechaniczny	cyprian.lachowicz@gmail.com
dr inż.	Andrzej	Leski	Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych	Z31	andrzej.leski@itwl.pl
dr inż.	Bogdan	Ligaj	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	bogdanj@utp.edu.pl
prof. dr hab. inż.	Tadeusz	Łagoda	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	t.lagoda@po.opole.pl
dr inż.	Tomasz	Machniewicz	Akademia Górniczo-Hutnicza im St. Staszica w Krakowie	Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki	machniew@agh.edu.pl
mgr inż.	Ewa	Marcisz	Politechnika Opolska	Mechaniczny	marciszewa@wp.pl
mgr inż.	Paweł	Marecki	Wojskowa Akademia Techniczna	Wydział Mechaniczny	pmarecki@wat.edu.pl
dr hab. inż. prof. nadzw.	Stanisław	Mroziński	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	stmpkm@utp.edu.pl
prof. dr hab. inż.	Andrzej	Neimitz	Politechnika Świętokrzyska	Mechatroniki i Budowy Maszyn	neimitz@tu.kielce.pl
dr hab. inż.	Adam	Niesłony	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	a.nieslony@po.opole.pl
prof. dr hab. inż.	Tadeusz	Niezgodziński	Politechnika Łódzka	Mechaniczny	tadnie@p.lodz.pl
mgr inż.	Karol	Niklas	Politechnika Gdańska	Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa	karnikla@pg.gda.pl

Tytuł	Imię	Nazwisko	Uczelnia	Wydział	E-mail
dr inż.	Krzysztof	Nowicki	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	knowicki@utp.edu.pl
prof. dr hab. inż.	Jerzy	Okrajni	Politechnika Śląska	Inżynierii Materiałowej i Metalurgii	jerzy.okrajni@polsl.pl
dr inż.	Roland	Pawliczek	Politechnika Opolska	Wydział Mechaniczny	r.pawliczek@po.opole.pl
mgr inż.	Łukasz	Pejkowski	UTP	WIM/Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn	lukasz.pejkowski@utp.edu.pl
mgr inz.	Michał	Piotrowski	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	michalpio86@wp.pl
mgr inż.	Piotr	Reymer	Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych	Niezawodności i Bezpieczeństwa Techniki Lotniczej	piotr.reymer@itwl.pl
dr inż.	Grzegorz	Robak	Politechnika Opolska	Mechaniczny	g.robak@po.opole.pl
dr inż.	Rajmund	Rytlewski	Politechnika Gdańska	Wydział Mechaniczny	rajryt@mech.pg.gda.pl
dr inż.	Jan	Sadowski	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Inżynierii Mechanicznej	sadjan@utp.edu.pl
prof. dr hab. inż.	Janusz	Sempruch	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	semjan@utp.edu.pl
dr hab. inż.	Dariusz	Skibicki	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	dariusz.skibicki@utp.edu.pl
mgr inż.	Radosław	Skocki	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Inżynierii Mechanicznej	rskocki@gmail.com
mgr inż.	Przemysław	Strzelecki	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	p.strzelecki@utp.edu.pl
dr inż.	Grzegorz	Szala	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	gszala@utp.edu.pl
prof. dr hab. inż.	Józef	Szala	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Inżynierii Mechanicznej	jszpkm@utp.edu.pl
mgr inż.	Tomasz	Tomaszewski	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Wydział Inżynierii Mechanicznej	tomaszewski@utp.edu.pl
profesor	Tomasz	Topoliński	UTP	WIM	topol@utp.edu.pl
dr hab. inż.	Krzysztof	Werner	Politechnika Częstochowska	Wydział Budownictwa	krzysztofwerner@tlen.pl
mgr inż.	Sławomir	Włodarczyk	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy	Inżynierii Mechanicznej	slaw.wlod@gmail.com
dr inż.	Tadeusz	Wozniak	Uniwersytet Kazimierza Wielkiego	Instytut Techniki	wozniak@ukw.edu.pl
mgr inż.	Wojciech	Wronicz	Instytut Lotnictwa	NET	wojciech.wronicz@ilot.edu.pl

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy
99987