

PROBLEMATYKA BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH W OPARCIU O KRUCHE PĘKANIE I NISKOCYKLOWE PRÓBY ZMĘCZENIOWE (LCF I MLCF).

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono krótką charakterystykę badań zmęczeniowych oraz możliwość porównywania danych uzyskanych w trakcie pomiarów współczynnika wytrzymałości zmęczeniowej K , określanym w oparciu o niskocyklową próbę zmęczeniową, ze stałą K_{Ic} – parametrem charakteryzującym kruche pękanie. Ponadto badania w zakresie niskocyklowym pozwoliły na wstępną walidację metody LCF i MLCF.

1. WSTĘP.

Różnorodność zastosowań tworzyw odlewniczych i dążenie do ich optymalnego wykorzystania sprawia, że istotną staje się możliwość zgromadzenia jak najpełniejszych danych o ich właściwościach. Jednym z podstawowych problemów, dotyczących właściwości materiałów jest znajomość ich zachowania się przy obciążeniach zmiennych i szybkozmiennych, czyli wytrzymałość zmęczeniowa [1]. Z tego też powodu dąży się do ustawicznego doskonalenia metod oceny właśnie w tym zakresie.

Jest wiele wyników dotyczących nowych modeli i kryteriów zmęczeniowych (w obszarze metod HCF i LCF) stanowiących podstawę do przewidywania żywotności różnych materiałów i wyrobów pracujących w warunkach jedno- i wielo-osiowego stanu obciążeń mechanicznych [1 - 6] w temperaturze otoczenia lub podwyższonej.

2. ZMĘCZENIE MATERIAŁU – WYBRANE ZAGADNIENIA

2.1 Charakterystyka badań w zakresie małej liczby cykli.

Analiza właściwości mechanicznych w zakresie niskocyklicznych obciążeń zmiennych (LCF) znana jest w literaturze w ujęciu Manson'a; Coffin'a i Morrow'a [7, 8, 9, 10] objęta również polską normą [11]; LCF polega na prowadzeniu badań w warunkach obciążeń symetrycznych. Obciążenie to polega na rozciąganiu i ściskaniu próbki, w zakresie naprężeń „hiperkrytycznych” tzn. powyżej wytrzymałości na zmęczenie, na ogół zaczynając od amplitudy naprężeń wywołujących odkształcenie trwałe nie mniejsze od 0,2%. Przyjęcie takich warunków prowadzi do ograniczenia ilości cykli, wywołujących zniszczenie próbki a wyniki badań na jednej próbce to jeden punkt na krzywej charakteryzującej właściwości zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli. Wynika stąd, że oznaczenia są tym bardziej precyzyjne im większą liczbą próbek się dysponuje. Zastosowanie omawianej próby LCF ogranicza się do materiałów charakteryzujących się dobrymi właściwościami plastycznymi, ponieważ cały zakres pomiarowy leży zasadniczo powyżej umownej granicy plastyczności [7,9].

Zgodnie z normą [12] i wg Manson'a, Coffin'a i Morrow'a [10] badanie polega na poddaniu próbek jednoosiowemu obciążeniu zmiennemu (rozciąganie-ściskanie), aż do jej zniszczenia, oraz rejestracji w czasie trwania próby liczby cykli i zależności naprężenie-odkształcenie (siła-przemieszczenie) w formie pętli histerezy. Amplituda obciążenia jest znacznie wyższa od wytrzymałości na zmęczenie, co pozwala doprowadzić do pęknięcia próbki przy ilości cykli niższej, a dla wyższych wartości amplitudy naprężenia, znacznie niższej, niż przyjęta tzw. „bazowa” ilość cykli. Próbę prowadzi się przy sterowaniu naprężeniem (siłą odniesioną do początkowego przekroju próbki), odkształceniem (bazy pomiarowej próbki) lub przemieszczeniem (układu realizującego obciążenie).

Wyznaczenie tym sposobem granicznej ilości cykli, dla kilku wartości amplitudy pozwala wyznaczyć szereg kryteriów oceny tworzywa, a także graniczną wartość odkształcenia.

Według wspomnianych badaczy można bowiem napisać:

$$\sigma_a = K' (\varepsilon_p)^{n'} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (2)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

gdzie: σ_a - amplituda naprężenia cyklu,

σ_f' - tzw. „współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej” równy w przybliżeniu wytrzymałości na rozciąganie R_m ,

ε_f' - rzeczywiste odkształcenie trwałe wywołane przez naprężenie σ_f' ,

$2N_f$ - liczba cykli obciążenia do pęknięcia próbki,

ε_p - odkształcenie trwałe (rzeczywiste wywołane przez $2N_f$ cykli obciążenia, przy czym: $\varepsilon_p = \ln(1 + \varepsilon_k)$, gdzie z kolei $\varepsilon_k = \Delta l_{trwałe} / l_0$,

K' - współczynnik wytrzymałości cyklicznej,

n' - wykładnik umocnienia przy obciążeniach cyklicznie zmiennych,

c - wykładnik odkształcalności zmęczeniowej.

Zakładając stałą (dla całego zakresu naprężeń, aż do wytrzymałości na zmęczenie) wartość modułu sprężystości E można napisać wyrażenie na odkształcenie sprężyste ε_e :

$$\varepsilon_e = \sigma_f / E * (2N_f)^b \quad (4)$$

Przyjmując $2N_f$ równe minimalnej ilości cykli, którą materiał musi przetrwać pod działaniem naprężeń zmiennych o amplitudzie σ_a równej wytrzymałości na zmęczenie („bazowa” ilość cykli), można napisać wyrażenie ujmujące odkształcenie całkowite (ε_c), po tej ilości cykli oraz po dowolnie mniejszej ilości cykli:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_e + \varepsilon_f = \varepsilon_e = \sigma_f / E * (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (5)$$

Podkreślenia wymaga fakt, że omówione parametry niskocyklowej próby zmęczeniowej według metodyki LCF wymagają od 6-10 próbek, co stwarza problemy w przypadku materiałów niejednorodnych strukturalnie. Nie bez znaczenia jest również wymagany czas trwania próby, który może wydłużać się niejednokrotnie nawet do kilku dni oraz świadomość, że na podstawie tak przeprowadzonego badania uzyskane wyniki ograniczone są tylko do parametrów ściśle związanych ze zmęczeniem materiału (b , c , n' , K i ε_{max}).

Z uwagi na powyższe przeprowadzono modyfikację tej próby i stworzono program zmodyfikowanej niskocyklowej próby zmęczeniowej, który w swej pierwotnej postaci stosowany był przez A. Karamarę [9] i M. Maj [7] i wreszcie dostosowany do nowoczesnego

systemu sterowania maszyną wytrzymałościową *MTS Test star IIs* [12] i nazywany przez autorkę „MLCF” (Modified Low Cycle Fatigue). W niniejszej pracy zostaną wymienione jego najważniejsze elementy, które wymagają kolejnych udoskonaleń z uwagi na konieczność zwiększenia uniwersalności całego programu.

Omawiany program pozwala na określenie modułu sprężystości zgodnie ze jej uogólnioną postacią, dla różnych zakresów naprężeń, dla ustabilizowanej histerezy mechanicznej:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (6)$$

gdzie: σ_1 ; ε_1 - naprężenie i odkształcenie dla dolnego wierzchołka pętli histerezy mechanicznej, σ_2 ; ε_2 - naprężenie i odkształcenie dla górnego wierzchołka tej pętli.

Następnie możliwe jest określenie granic umownych, w tym: umowną granicę sprężystości – $R_{0,02}$; umowne granice: $R_{0,05}$ i $R_{0,1}$; umowną granicę plastyczności – $R_{0,2}$; granicę akomodacji – R_a ; ocenioną wartość wytrzymałości zmęczeniowej przy zginaniu obrotowym – Z_{go} ; stałe materiałowe wyznaczone w trakcie próby zmęczeniowej przy obniżonej ilości cykli: b , c , n' oraz naprężenie umowne – K , maksymalne, całkowite i dopuszczalne odkształcenie – ε_{max} – i oczywiście wytrzymałość na rozciąganie R_m .

Wytrzymałość zmęczeniową Z_{go} , konieczną do wykorzystania w obliczeniach parametrów próby MLCF, ocenia się na podstawie doświadczalnego wykresu sporządzonego dla różnorodnej grupy tworzyw, począwszy od czystych metali a skończywszy na stopach żelaza i stopach metali nieżelaznych [7, 9].

Celem wyznaczenia wielkości b , c , n' i K oraz ε_{max} , przyjęto następujące założenia [7, 9]:

- zaburzenia jednoosiowego pola naprężeń przy ściskaniu, eliminuje się poprzez stosowanie cykli jednostronnych (podczas rozciągania) w próbie zmęczeniowej,
- zależność odkształceń trwałych, wywołanych założoną, niewielką ilością cykli (np. dwudziestoma cyklami obciążenie-odciążenie) wykazuje analogiczną zależność od amplitudy cyklu, jak odkształcenie po pęknięciu próbki, tym bardziej, że odkształcenie trwałe osiągnięte po 20 cyklach zmienia się już nieznacznie, przy powiększaniu ilości cykli lub nie zmienia się w ogóle [7, 9],
- właściwości mechaniczne wspomniane na początku niniejszego rozdziału wyznacza się przy użyciu tylko jednej próbki,
- przebiegi prostych wg równań (2) i (3), w podwójnej skali logarytmicznej, wyznacza się na podstawie położenia punktów o współrzędnych:
 $1/\ln 20$, $\ln R_m$ i $1/\ln(2N_f)$, $\ln(Z_{go})$ w przypadku zależności (2) oraz
 $1/\ln 20$, $\ln \varepsilon_f$ i $1/\ln(2N_f)$, $\ln \varepsilon_z$ w przypadku zależności (3),
- ocenę wytrzymałości na zmęczenie, przy zginaniu obrotowym, przeprowadza się wg [7, 9].

Wszystkie omówione powyżej wielkości uzyskuje się w trakcie badania jednej próbki i to jest najcenniejsze w całej metodzie, bowiem wszystkie statyczne wielkości mechaniczne i te odpowiadające za niskocyklowe zmęczenie pozwalają bardzo dokładnie scharakteryzować analizowany materiał niezależnie od tego z jak dalece niejednorodnym materiałem mamy do czynienia. W przypadku określania wielkości zmęczeniowych próbek.

2.2. Podstawowe zagadnienia związane z określaniem odporności na pękanie K_c .

Znajomość prędkości pękania w określonych warunkach obciążenia umożliwia przewidywanie żywotności elementów w tych warunkach w przypadku istnienia różnego rodzaju defektów, pęknięć i ich rozwoju.

Prędkość pękania dl/dN wyraża się w przyroście długości pęknięcia dl w ciągu jednego cyklu obciążenia, a więc w milimetrach na cykl lub w metrach na cykl. Prędkość pękania można określić z nachylenia stycznej do krzywej rozwoju pęknięcia, czyli przyrostu długości pęknięcia w funkcji liczby cykli N [8, 15].

U podstaw zdecydowanej większości rozważań na temat kruche pękania, w tym również mechaniki pękania, leży klasyczna hipoteza szczelin A.A. Griffitha. Według niej szczelina o długości $2l$ w sprężysto i równomiernie rozciąganej płycie o nieskończonej wielkości i jednostkowej grubości powoduje jakby odciążenie obszaru wokół szczeliny, następuje spadek energii odkształcenia sprężystego, natomiast wzrasta energia powierzchniowa konieczna do utworzenia nowej, swobodnej powierzchni. Suma obu energii stanowi całkowitą energię rozwoju pęknięcia [15].

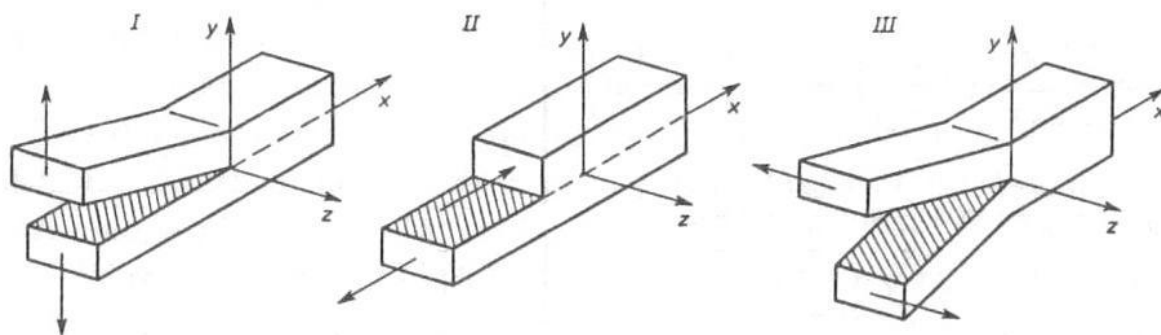
Po osiągnięciu maksimum dalszy rozwój pęknięcia charakteryzowany jest przez energię potencjalną odkształcenia sprężystego płyty, wtedy szczelina o długości krytycznej $2l$ jest w stanie metastabilnym i rozwija się samoistnie z prędkością zbliżoną do prędkości dźwięku, powodując kruche pękanie. Krytycznej wielkości szczeliny odpowiada naprężenie krytyczne σ_{kr} [15]:

$$\sigma_{kr} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l_{kr}}} \quad (7)$$

Z drugiej strony wiadomo, że wychodząc od maksimum energii rozwoju pęknięcia można określić współczynnik intensywności naprężeń K , który w przypadku krytycznej długości l_{kr} i krytycznego naprężenia σ_{kr} staje się wielkością krytyczną K_c i nazywany jest odpornością na pękanie:

$$K_c = \sigma_{kr} \sqrt{\pi l_{kr}} = \sqrt{2 E \gamma_{kr}} \quad (8)$$

Powszechnie używa się zapisu K_{Ic} , co oznacza odporność na pękanie w płaskim stanie odkształcenia w najczęściej spotykanym przypadku obciążenia, do którego odnosi się wskaźnik I (rys.1. [15]).



Rys. 1 Trzy podstawowe przypadki rozwoju pęknięcia [15].

3. MATERIAŁ BADAWCZY, METODYKA BADAŃ I WYNIKI.

3.1. Próba określenia kryterium kruchości na podstawie badań niskocyklowych MLCF.

Zagadnieniem możliwości określenia kruchości tworzyw zajmowano się wcześniej w pracy [17], proponując nowe kryterium kruchości w oparciu o badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli. W niniejszej pracy zaadaptowano te rozważania do zmodyfikowanej niskocyklowej próby zmęczeniowej MLCF i dodatkowo jeszcze skonfrontowano, dla wybranych przebadanych gatunków żeliwa sferoidalnego, oraz z danymi literaturowymi dotyczącymi odporności na pękanie K_{IC} .

Zależność określoną poprzez równanie (1) można sformułować następująco:

$$\ln \sigma_a = \ln K + n \ln \varepsilon_p \quad (9)$$

$$K = \sigma_a, \text{ gdy } \ln(\varepsilon_p) = 0, \quad (10)$$

z kolei z definicji :

$$\varepsilon_p = \ln(1 + \varepsilon_k), \quad (11)$$

gdzie: $\varepsilon_k = \Delta l/l_0$, czyli odkształcenie względne.

Z powyższego wynika, że:

$$\ln \varepsilon_p = \varepsilon_p = \varepsilon_k = e - 1 \quad (12)$$

Jak stąd widać parametr K określony na podstawie niskocyklowej próby zmęczeniowej MLCF jest takim naprężeniem umownym, które wywołałoby (gdyby było to możliwe) wydłużenie względne (ε_k) wynoszące około 1,7 czyli 170%. Jest to wydłużenie bardzo duże, praktycznie nieosiągalne, stąd też umowne naprężenie K będzie zawsze większe od wytrzymałości na rozciąganie. Zatem zaproponowano jako kryterium kruchości różnicę pomiędzy naprężeniem umownym K a wytrzymałością na rozciąganie R_m :

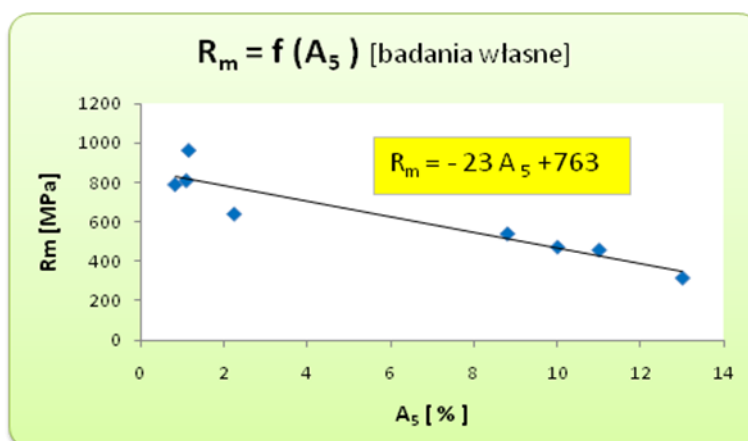
$$B = K - R_m \quad (13)$$

Celem sprawdzenia przydatności proponowanego kryterium przeprowadzono badania dla wybranych gatunków żeliwa sferoidalnego zgodnie z procedurą MLCF opisaną w pracy [12] w wyniku której m.in. wyodrębniono do potrzeb niniejszej pracy wytrzymałość na rozciąganie – R_m , naprężenie umowne w próbie MLCF – K , A_5 i policzono B . Z danych literaturowych [16] zaczerpnięto analogiczne wartości, tzn. R_m i A_5 oraz odporność na kruche pękanie K_{IC} . Wyniki zestawiono w tabeli 1.

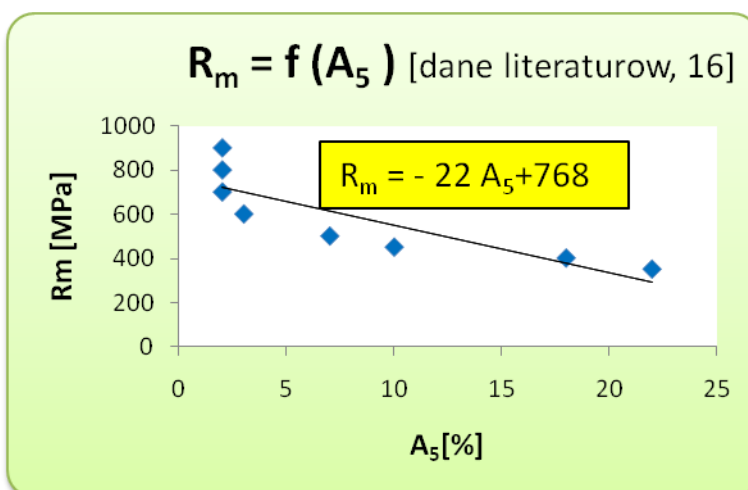
Tabela 1 Porównanie dla niektórych gatunków żeliwa sferoidalnego wybranych właściwości mechanicznych.

| Gatunek żeliwa | Właściwości mechaniczne | | | | | | |
|----------------|-------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| | R_m [MPa] [16] | R_m [MPa] (badania własne) | A_5 [%] [16] | A_5 [%] (badania własne) | K [MPa] (badania własne) | $B = K - R_m$ [MPa] (badania własne) | K_{Ic} [MPa*m ^{1/2}] |
| EN-GJS-350-22 | 350 | 312 | 22 | 13 | 3803 | 3491 | 31 |
| EN-GJS-400-18 | 400 | 455 | 18 | 11 | 2816 | 2361 | 30 |
| EN-GJS-450-10 | 450 | 470 | 10 | 10 | 2500 | 2030 | 23 |
| EN-GJS-500-7 | 500 | 538 | 7 | 8,8 | 3631 | 3093 | 20 |
| EN-GJS-600-3 | 600 | 639 | 3 | 2,25 | 2575 | 1936 | 25 |
| EN-GJS-700-2 | 700 | 790 | 2 | 0,83 | 1645 | 855 | 15 |
| EN-GJS-800-2 | 800 | 810 | 2 | 1,1 | 1498 | 688 | 15 |
| EN-GJS-900-2 | 900 | 965 | 2 | 1,16 | 1426 | 461 | 14 |

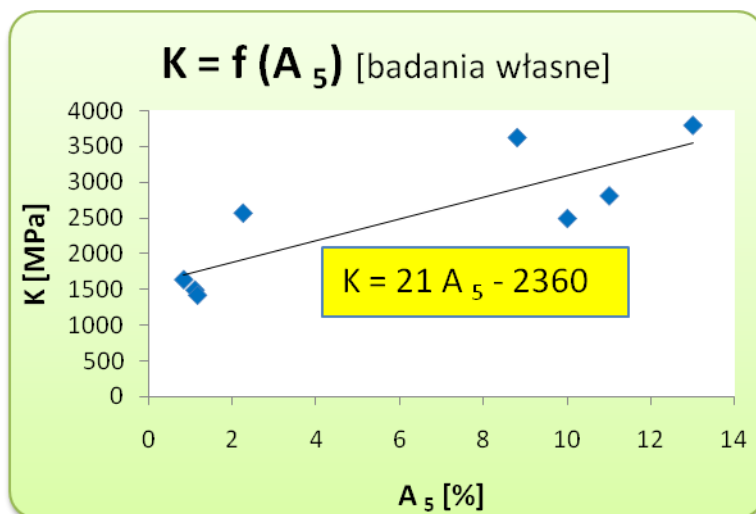
Następnie przeprowadzono analizę istotności korelacji, zachodzących ewentualnie między A_5 z jednej strony, a R_m , K , B i K_{Ic} – z drugiej strony. Ponadto przeprowadzono również analizę istotności korelacji pomiędzy proponowanym kryterium kruchości B a K_{Ic} . Wyniki zestawiono na rysunkach 2-6.



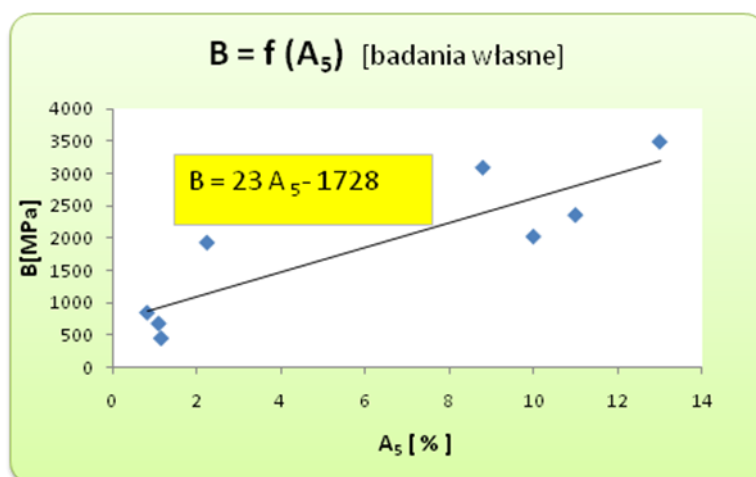
Rys. 2. Równanie regresji $R_m = f(A_5)$. Współczynnik korelacji $r = -0,9316$ dla $\alpha = 0,05$. Korelacja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$.



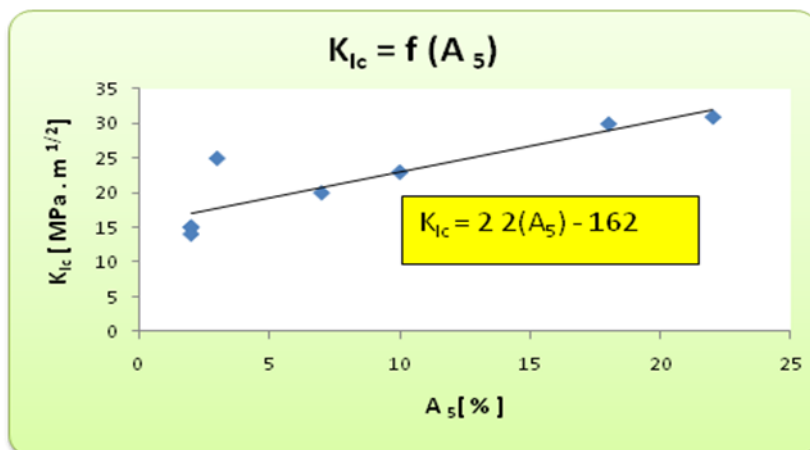
Rys. 3. Równanie regresji $R_m = f(A_5)$. Współczynnik korelacji $r = -0,8514$.
Korelacja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$.



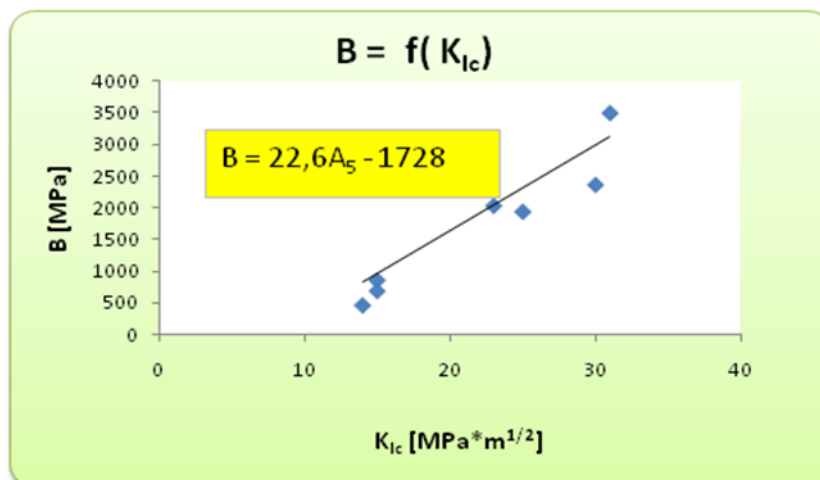
Rys. 4. Równanie regresji $K = f(A_5)$. Współczynnik korelacji $r = 0,8436$.
Korelacja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$.



Rys. 4. Równanie regresji $B = f(A_5)$. Współczynnik korelacji $r = 0,8764$.
Korelacja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$.



Rys. 5. Równanie regresji $K_{Ic} = f(A_5)$. Współczynnik korelacji $r = 0,8802$.
Korelacja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$.



Rys. 5. Równanie regresji $B = f(K_{Ic})$. Współczynnik korelacji $r = 0,8114$.
Korelacja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$.

Z przeprowadzonych rozważań wynika występowanie istotnej korelacji dla wszystkich badanych zależności, a dodatkowo na podkreślenie zasługuje fakt wzajemnej korelacji pomiędzy zaproponowanym parametrem kruchości B , obliczanym na podstawie niskocyklowej próby zmęczeniowej MLCF, a odpornością na kruche pękanie K_{Ic} .

3.2. Próba walidacji metody LCF i MLCF.

W niniejszej pracy przedstawiono tylko część wyników ze wstępnej walidacji metody MLCF i LCF. Szerzej omówiono to zagadnienie w pracach [14, 19]. Procedurę MLCF szczegółowo opisaną w pracy [12] zastosowano praktycznie między innymi w badaniach [7, 13]. Porównanie wybranych parametrów zmęczeniowych uzyskanych za pomocą klasycznej metody LCF [7] i zmodyfikowanej metody MLCF (wcześniejsze wyniki badań własnych – [7]) dla trzech rodzajów żeliwa; z grafitem sferoidalnym, wermikularnym i płatkowym pokazano w tabeli 2 [14].

Tabela 2. Porównanie wybranych parametrów zmęczeniowych uzyskanych za pomocą klasycznej metody LCF i zmodyfikowanej MLCF trzech rodzajów żeliwa.

| właściwości zmęczeniowe | żeliwo | | | |
|--|--|---|--|---|
| | Klasyczna próba LCF (dane literaturowe dla żeliwa sferoidalnego) [7] | MLCF (zmodyfikowana LCF – badania własne dla żeliwa sferoidalnego [10]) | MLCF (zmodyfikowana LCF – badania własne dla żeliwa wermikularnego [10]) | MLCF (zmodyfikowana LCF – badania własne dla żeliwa szarego [10]) |
| wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej (b) | -0,076 | -0,076 | -0,060 | -0,050 |
| wykładnik odkształcalności zmęczeniowej (c) | -0,771 | -0,708 | -0,516 | -0,264 |
| współczynnik wytrzymałości cyklicznej (K') | 649,100 | 1206,00 | 1372,00 | 3590,00 |
| wykładnik umocnienia przy obciążeniach cyklicznie zmiennych (n') | -0,075 | 0,264 | 0,300 | 0,504 |
| współczynnik odkształcalności zmęczeniowej (ϵ'_f) | 0,864 | brak danych | brak danych | brak danych |
| odkształcenie max. ($\epsilon_{\max} \cdot 10^6$) | brak danych | 832,00 | 1372,00 | 1358,00 |

Przeprowadzona analiza porównawcza pomiędzy metodami LCF i MLCF (tabela 3) pozwala zauważyć występowanie dość dobrej zgodności między parametrami zmęczeniowymi żeliwa sferoidalnego wyznaczanymi za pomocą metody LCF (dane literaturowe) i metodą MLCF – wyniki badań własnych (tabela 2). Ponadto na podkreślenie zasługuje fakt wyraźnego związku wykładnika wytrzymałości zmęczeniowej Basquina z postacią grafitu i jest najwyższy dla żeliwa sferoidalnego, a najniższy dla żeliwa szarego z grafitem płatkowym (tabela 2.).

Wnioski:

Wyniki przedstawione w pracy wykazały istotne korelacje między wydłużeniem całkowitym (A_5) a proponowanym kryterium kruchości B, naprężeniem umownym K, i odpornością na kruche pękanie K_{Ic} . Bardzo istotna z punktu widzenia poznawczego wydaje się być zależność korelacyjna między zaproponowanym kryterium kruchości B a odpornością na kruche pękanie K_{Ic} . Za korzystne można uważać to, że proponowane kryterium kruchości wiąże się z właściwościami w stosunkowo dużej objętości tworzywa, podczas gdy wyniki odporności na kruche pękanie są zdeterminowane przez małą objętość tworzywa w strefie karbu. Biorąc pod uwagę, że analiza porównawcza metod LCF i MLCF, daje nadzieję na możliwość szerszego zastosowania w badaniach zmęczeniowych zmodyfikowanej niskocyklowej próby MLCF, rozszerzenie jej o określenie kruchości badanego tworzywa wydaje się istotne i otwiera pole dla dalszych prac zmierzających do ich wdrożenia.

Literatura:

- [1] St. Kocańda, A. Kocańda: *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*, PWN, Warszawa 1989 r.
- [2] G. Gwenaëlle, *A statistical approach to multi-input equivalent fatigue loads for the durability of automotive structures, doctor thesis*, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Göteborg, Sweden, 2006.
- [3] Nguyen Thi Thu Huyen, *Effect des heterogenetes microstructurales sur le comportement en fatigue multiaxiale a grand nombre de cycles. Application a l'usinage assiste laser, doctor thesis*, Arts Et Métiers ParisTech, Paris, 2008.
- [4] O. Barrau, *Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud, doctor thesis*, Université Toulouse 2004.
- [5] Y. Fares, *Dimensionnement en fatigue des assemblages boulonnés à l'aide de critères de fatigue multiaxiale, doctor thesis*, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [6] A. Banville, *Prévision de durée de vie en fatigue multiaxiale sous chargements réels: vers des essais accélérés, doctor thesis*, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, 2001.
- [7] M. Maj *Kryteria wytrzymałości eksploatacyjnej odlewów żeliwnych w oparciu o właściwości mechaniczne tworzyw, doctor thesis*, AGH, Krakow 1984.
- [8] St. Kocańda, A. Kocańda, *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*, PWN, Warszawa 1989 r., [to jest w poz. 1].
- [9] A. Karamara, *Badania materiałowe wybranych gatunków stali niskostopowej w zakresie niskocyklicznych obciążeń zmiennych*, Kraków 1980. Z-5216/79.
- [10] [D.F. Socie, M.R. Mitchell, E.M. Caulfield, *Fundamentals of Modern Fatigue Analysis, A Report of the Fracture Control Program*, College of Engineering, University of Illinois Urbana, Illinois 61801, April, 1977; revised January 1978.
- [11] PN-84/H-04334: *Badania niskocyklowego zmęczenia metali*.
- [12] Projekt badawczy 4T08B 006 25 pt.: *Zastosowanie zmodyfikowanej, niskocyklowej próby zmęczeniowej do wyznaczania właściwości mechanicznych żeliwa ADI w temperaturze pokojowej i podwyższonej*, kierownik projektu – dr inż. Maria Maj, Kraków 2005.
- [13] K. Pietrzak, A. Klasik, Z.L. Kowalewski, D. Rudnik, *Quantitative relationships between microstructural and mechanical parameters of steels with different carbon content*, "International Journal of Modern Physics B" (IJMPB), 2008 Vol.: 22 Issue: 31/32 (30 December 2008), pp. 5819-5824.
- [14] M. Maj, W. Moćko, K. Pietrzak, A. Klasik, *Methodological conditionings of a modified low cycle fatigue method of tempered 41Cr4 steel in comparison to some other materials*, Archives of Foundry Engineering vol. 9, Issue 4/2009, 129-134
- [15] *Podstawy konstrukcji maszyn t. 1*, pod redakcją M. Dietricha, Wydawnictwo Nauk.-Tech. Kraków 1995.
- [16] *Zasady doboru materiałów inżynierskich z kartami charakterystyk*, redaktor naukowy L. Dobrzański, Wyd. II uzup. , Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [17] M. Maj *Próba sformułowania kryterium kruchości tworzyw odlewniczych na podstawie wyników próby niskocyklowej*, [w:] *Materiały X Sympozjum Naukowego z okazji Dnia Odlewnika 1984*, Wydawnictwo AGH, Kraków 1984.

M. Maj *Praca własna nr 10.10.170.345: Optymalizacja programu badań niskocyklowej próby zmęczeniowej*