

Wiesław CHLADEK

NIKTÓRE KRYTERIA OCENY ŻELIW KOKILOWYCH
OPARTE NA BADANIACH ZMĘCZENIA CIEPLNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono metody oceny przydatności żeliw do produkcji kokil i wlewnic, oparte na badaniach zmęczenia cieplnego w jednoosiowym stanie naprężenia. Uwzględniając asymetrię pętli histerezy charakteryzującej dany cykl termiczno-mechaniczny wprowadzono zależności służące do szacunkowej oceny materiału oraz wzory pozwalające określić liczbę cykli do momentu powstania pęknięcia. Rozwój pęknięć opisano na podstawie zależności zweryfikowanych w czasie badań płytek kołowych poddawanych powierzchniowym uderom cieplnym.

1. Wprowadzenie

Metalowe formy trwale są typowym przykładem oprzyrządowania pracującego w warunkach cyklicznie powtarzających się uderów cieplnych. Okresowe kontakty z ciekłym metalem powodują występowanie nierównomiernych rozkładów temperatury na przekrojach poprzecznych ścianek formy i związanych z tym odkształceń i naprężeń cieplnych.

W przypadku nieodpowiedniego doboru materiału możemy mieć do czynienia ze znacznie szybszym zużywaniem się form. Przyczyną tego jest powstawanie głębokich pęknięć lub zmian wymiarowych wynikających z wykruszania popękanych powierzchni wnęki roboczej, czy też z innych odkształceń wywołanych naprężeniami termicznymi. Biorąc pod uwagę ten fakt, coraz częściej dokonuje się oceny materiału pod względem jego przydatności do pracy w okresowym kontakcie z ciekłym metalem, wykorzystując kryteria określające jego odporność na zmęczenie cieplne. Kryteria te oparte zarówno na analizie wybranych czynników wpływających na proces zmęczenia cieplnego [1], jak i na różnego rodzaju badaniach symulacyjnych [2, 3, 4], stanowią podstawę do przewidywania trwałości form.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie zależności służących do oceny żeliw wlewnicowych i kokilowych. Zależności te są wynikiem badań zmęczenia cieplnego w jednoosiowym stanie naprężenia, gdzie próbka odwzorowuje pracę warstwy wierzchniej materiału oraz badań przy bezpośrednim realizowaniu uderów cieplnych na płytkach kołowych.

2. Ocena odporności na udar cieplny na podstawie badań w jednoosiowym stanie naprężenia

Mechanizmy zniszczenia materiału pracującego w zmiennych polach temperatur zależne są od wzajemnych relacji pomiędzy obciążeniami zewnętrznymi, własnościami mechanicznymi i fizycznymi a przebiegiem cyklu zmian temperatury.

Przeprowadzając badania żeliw kokilowych i wlewnicowych na sztywnym stanowisku w zakresach temperatur odpowiadających zmianom temperatury na powierzchni form stwierdzono, iż w przypadku żeliw czynnikiem decydującym o szybkości, z jaką postępuje proces niszczenia, jest różnica pomiędzy naprężeniami cieplnymi $\sigma_{T_{min}}$ a naprężeniami niszczącymi $R_{m_{T_{min}}}$ w minimalnej temperaturze cyklu [2, 4, 6]. Natomiast wpływ odkształceń plastycznych kumulowanych w materiale w kolejnych cyklach uwidacznia się dopiero wówczas, jeśli zmiana parametrów cyklu nie pociąga za sobą zmiany stosunku $\sigma_{T_{min}}/R_{m_{T_{min}}}$. Możemy więc dokonać wstępnej oceny badanych materiałów w oparciu o analizę kształtu pętli histerezy $F(T)$ odpowiadającej pierwszemu cyklowi grzania i chłodzenia próbki sztywno zamocowanej. W tym celu przyjęto dwa wyrażenia: pierwsze określające zapas nośności (ZN):

$$ZN = \frac{F_{m_{T_{min}}} - F_{T_{min}}}{F_{m_{T_{min}}}} 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$F_{m_{T_{min}}}$ - siła niszcząca próbkę w minimalnej temperaturze cyklu wyznaczona w statycznej próbie rozciągania,

$F_{T_{min}}$ - wartość siły w minimalnej temperaturze cyklu wyznaczona z wykresu $F(T)$,

oraz drugie określające zgniot cieplny (ZC):

$$ZC = \frac{T_R - T_S}{T_R} 100\% \quad (2)$$

gdzie:

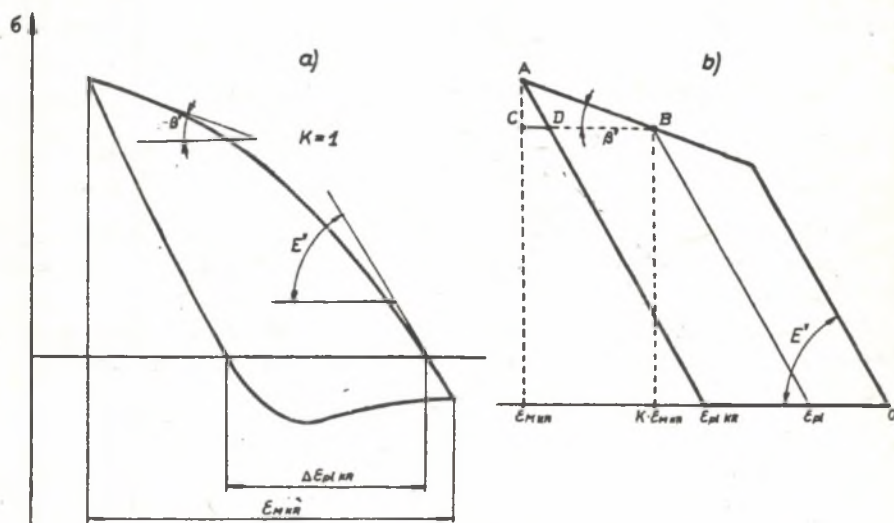
T_R - temperatura odpowiadająca początkowi rozciągania,

T_S - temperatura odpowiadająca początkowi ściskania w drugim półcyklu grzania.

Wielkości $F_{m_{T_{min}}}$, T_R i T_S wyznaczamy z wykresu $F(T)$ w sposób pokazany na rysunku 1.

Wielkości odkształceń plastycznych ϵ_{pl} i naprężeń w minimalnej temperaturze cyklu σ_{Tmin} powinny być wyznaczone w warunkach możliwie jak najbardziej zbliżonych do panujących na powierzchni wnęki roboczej formy. Wymaga to zachowania zgodności przebiegu cyklu temperaturowego oraz uwzględnienia wpływu odkształceń warstw materiału głębiej położonych na odkształcenia warstwy wierzchniej poddanej bezpośrednim udom ciepłym. Dokonujemy tego poprzez właściwy dobór stosunku odkształceń mechanicznych ϵ_M do wywołujących je odkształceń termicznych ϵ_T [7]. Stosunek ten oznaczany literą K [8] jest zazwyczaj znacznie mniejszy od jedności. Cykl, w którym $K = 1$, został nazwany cyklem krytycznym, stąd wszystkie parametry określające ten cykl są oznaczane indeksem KR.

Typowy kształt pętli histerezy uzyskiwany dla żelii kokilowych w zakresach temperatur odpowiadających wahaniom temperatury na powierzchni formy, przy współczynniku $K = 1$, pokazano na rysunku 2a. Przyjmując, że część



Rys. 2. Charakterystyka termiczno-mechaniczna żelii kokilowego w zakresie temperatur od 200 do 700°C

a) ustabilizowana pętla histerezy dla współczynnika $K = 1$, b) model obrazujący zmiany kształtu pętli histerezy pod wpływem zmian współczynnika K

pętli histerezy odpowiadającą chłodzeniu możemy zastąpić modelem sprężysto-plastycznym z liniowym umocnieniem wg rysunku 2b, widzimy, iż zmniejszenie wartości K powoduje spadek wartości odkształceń sprężystych

$$\Delta \epsilon_s = DC = \frac{\Delta \sigma}{E(T)} = \frac{\epsilon_{MKR}(1-K) \operatorname{tg} \beta}{E'(T)} \quad (5)$$

stąd naprężenia σ_{Tmin} dla dowolnej wartości K będą równe:

$$\sigma_{Tmin} = \sigma_{TminKR} - \varepsilon_{MKR}(1 - K)tg\beta' \quad (6)$$

a wielkość odkształceń plastycznych wyniesie:

$$\Delta\varepsilon_{pl} = K\varepsilon_{plKR} + \varepsilon_{SKR}(K - 1) + \frac{\varepsilon_{MKR}(1 - K)tg\beta'}{E'(T)} \quad (7)$$

Wartości E' i β' charakteryzujące ustabilizowaną pętlę histerezy w danym cyklu cieplnym określamy w sposób zaznaczony na rysunku 2a.

Podstawiając wyrażenie (6) do wzoru (3) oraz wyrażenie (7) do wzoru (4), możemy na podstawie cyklu krytycznego wyznaczyć liczbę cykli do pęknięcia dla dowolnej wartości K .

Przedstawione zależności zweryfikowano w badaniach przeprowadzanych w szerokim zakresie zmian cyklu temperaturowego oraz współczynnika K , co pozwoliło wykazać poprawność przyjętych założeń. Ponadto stwierdzono, iż w przypadku badanego żeliwa zmiana cyklu temperaturowego powoduje we wzorze (4) zmianę stałej materiałowej C , natomiast przy posługiwaniu się wzorem (3) stałe materiałowe są niezależne od przebiegu cyklu temperaturowego.

3. Opis rozwoju pęknięć na powierzchni poddanej udom ciepłym

Doświadczenie w warunkach przemysłowych wykazuje, iż pojawienie się drobnej siatki pęknięć na powierzchni roboczej form metalowych (określone liczbą N_z) następuje już w początkowym okresie eksploatacji i zasadniczo nie wpływa na jakość produkowanych odlewów. Należy więc przyjąć jako dodatkowe kryterium decydujące o szybkości, z jaką postępuje proces niszczenia formy, obok momentu inicjacji pęknięcia, jego dalszą propagację.

Dla zbadania rozwoju pęknięć pod wpływem powierzchniowych udom ciepłych przyjęto próbkę o kształcie płytki kołowej, którą po nagraniu do maksymalnej temperatury cyklu poddawano gwałtownemu chłodzeniu [2]. Kształt próbki ułatwiał opis pól temperatur i naprężeń cieplnych [4], natomiast o realizacji udu ciepłego podczas chłodzenia zadecydowały wyniki badań wykazujące decydującą rolę naprężeń rozciągających w procesie zmęczenia ciepłego żeliwa. Biorąc pod uwagę fakt, iż na rzeczywistym obiekcie wartości współczynnika K są niewielkie, przyjęto, iż warstwa wierzchnia wnętrza roboczej formy będzie pracować w warunkach dostosowania plastycznego. Zjawisko to wystąpi zwłaszcza w momencie spadku naprężeń w wyniku pojawienia się pierwszych pęknięć.

Przy takim założeniu rozwój powstałej szczeliny w kolejnych cyklach opisano wyrażeniem:

$$l = B W_T \epsilon_T (1 - n)(N - N_Z)^{\frac{1}{1-n}} \quad (8)$$

gdzie:

B, n - stałe materiałowe,

N - liczba cykli,

N_Z - liczba cykli do momentu inicjacji pęknięcia,

l - długość szczeliny,

$$W_T = \frac{G_{Tmin}}{Rm_{Tmin}} \approx \frac{\beta_T \Delta T \epsilon_{Tmin}}{Rm_{Tmin}}$$

β_T - współczynnik rozszerzalności liniowej,

ϵ_{Tmin} - moduł sprężystości podłużnej w temperaturze minimalnej cyklu,

a szybkość jej propagacji określono następującą zależnością:

$$\frac{dl}{dN} = B W_T^2 \epsilon_T l^n \quad (9)$$

Przedstawione wzory okazały się szczególnie przydatne podczas badań wpływu powłok ochronnych (nanoszonych metodami odlewniczymi na powierzchnie wnek roboczych) na trwałość kokil. Wykazano [2], że określenie wybranych własności warstwy wierzchniej pozwala przewidzieć szybkość, z jaką będzie następował proces niszczenia. Kokile z naniesionymi powłokami, dla których wskaźnik W_T malał, wykazywały w trakcie badań eksploatacyjnych wyraźny wzrost trwałości.

Można więc wnioskować, że ocena materiałów przeznaczonych na metalowe formy trwałe w oparciu o kryteria ustalone w czasie badań zmęczenia cieplnego jest bardziej miarodajna niż stosowane niekiedy kryteria oparte na stabilności struktury czy odporności na utlenianie. Procesy te mogą stanowić podstawę oceny jedynie w przypadku materiałów o podobnej odporności na udary cieplne, gwarantującej, iż nie nastąpi pęknięcie lub wypaczenie formy już w pierwszym okresie jej eksploatacji.

LITERATURA

- [1] Wiejnik A.J.: Litje w kokil. Maszynostrojenije, Moskwa 1980.
- [2] Lamber T., Chladek W.: Wpływ powłok ochronnych ze stopów miedzi z niklem na zmęczenie cieplne żeliwa szarego. Inżynieria Materiałowa nr 4, Katowice 1981.

- [3] Weroniński A.: Analiza przemian strukturalnych i mechanizmu pękania form stalowych pod wpływem zmęczenia cieplnego w procesie odśrodkowego odlewania rur. *Mechanika* z. 11, Kielce 1976.
- [4] Lamber T., Chladek W., Ukrajni J.: Metoda badania wpływu warstwy wierzchniej na trwałość materiału poddanego cyklicznym udom ciepłym. *Mater. konf. pt. "Materiały na urządzenia energetyczne i technologiczne pracujące w podwyższonych temperaturach"*, Katowice 1980.
- [5] Chladek W., Cieśla M.: Ocena odporności na udar cieplny żeliw przeznaczonych na wlewnice hutnicze. *Inżynieria Materiałowa* nr 5, Katowice 1981.
- [6] Lamber T. i inni: Badania wpływu zmiennych pól temperatur na zjawiska dekohezji oraz utratę własności eksploatacyjnych metali. *Sprawozdanie z pracy badawczej MR-I-22, nie publikowane*. Katowice 1982.
- [7] Chladek W., Plaza M.: Techniki prowadzenia badań na sztywnych konstrukcjach i maszynach serwohydraulicznych. *Inżynieria Materiałowa* nr 4, Katowice 1982.
- [8] Pisarenko G.S. i inni: *Proczność materiałów pri wysokich temperaturach*. Naukowa Dumka, Kijew 1966.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Andrzej Weroniński

НЕКОТОРЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КОКИЛЬНЫХ ЧУГУНОВ НА ОСНОВЕ
ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОЙ УСТАЛОСТНОСТИ

Р е з ю м е

В работе представлены методы оценки пригодности чугунов для производства кокилей и изложниц, основанные на исследованиях тепловой усталости в одноосном состоянии напряжения. Принимая во внимание асимметрию гистерезисной петли, характеризующую данный термическо-механический цикл, даны зависимости для оценки материала а также формулы, позволяющие определить число циклов до момента возникновения трещины. Процесс развития трещины описан на основе зависимостей проверенны во время исследования кольцевых пластинок, подверженных поверхностным тепловым ударам.

SOME CRITERIA OF CAST IRON FOR METAL MOULDS ESTIMATION BASED
ON THERMAL FATIGUE TESTS

S u m m a r y

Methods of estimation of cast iron usability for metal moulds based on thermal fatigue tests in one axis stress state are presented. Taking into account an asymmetric hysteresis cycle in the thermo-mechanical cycle expressions for material estimations are found. A number of cycles until cracking moment is predicted and crackings development is described. The relations have been found and verified during investigations with circular plates stressed thermally superficially.