ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: HUTNICTWO z. 26 Nr kol. 800

Jerzy OKRAJNI
Maciej PUCHAŁA
Donat RENOWICZ

METODA OCENY TRWAŁOŚCI ELEMENTÓW WALCOWYCH PODDANYCH ODDZIAŁYWANIU CYKLICZNYCH ZMIAN TEMPERATUR

Streszczenie. W pracy omówiono czynniki determinujące trwałość obiektu poddanego oddziaływaniu cyklicznych zmian pola temperatur. Przedstawiono sposób doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych walca z otworem umieszczonym w osi ze względu na kryterium trwałości. Wyodrębniono dwie podstawowe metody badania tworzywa przeznaczonego na elementy pracujące w warunkach zmęczenia cieplnego - badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli oraz badania odporności na pękanie. Omówiono sposób określania, na podstawie badań laboratoryjnych tworzywa, kryterialnych parametrów niszczenia, ze zwróceniem uwagi na możliwości ich wykorzystania w procesie konstruowania, dla oceny trwałości obiektu.

Konieczność zapewnienia wysokiej niezawodności urządzeń hutniczych skierowała w ostatnich latach wysiłki ośrodków badawczych na poznawcze, podstawowe problemy trwałości w warunkach zmęczenia cieplnego. Obecnie można wyróżnić dwa kierunki, w których zmierzają badania tego procesu. Jeden z nich dotyczy zagadnień związanych z opracowaniem charakterystyk wytrzymałościowych dla tworzyw pracujących w złożonych warunkach obciążeń cieplnych i mechanicznych, zaś drugi wiąże się z zagadnieniem doboru cech geometrycznych i kryteriów trwałości konstrukcji. Stosunkowo nieliczne prace prezentują problemy mechanizmów zmęczenia cieplnego konkretnych urządzeń, jak również ich elementów.

Analiza pola temperatur i naprężeń

Projektowanie elementów maszyn i urządzeń, pracujących w warunkach działania zmiennej temperatury, powinno z reguły opierać się na zasadach różnych od tych, które obowiązują obecnie dla konstrukcji obciążonych zewnętrznym polem siłowym. Cechy konstrukcyjne określone ze względu na wielkość obciążeń cieplnych oraz obciążeń zewnętrznym polem siłowym mogą bowiem być przeciwstawne. Zaprojektowanie wytrzymałej i trwałej konstrukcji wymaga wówczas optymalizacji geometrycznej, której jednym z niezbędnych elementów jest analiza pola temperatur i naprężeń. Dla jej przeprowadzenia przyjmuje się model obliczeniowy obiektu zdeterminowany cechami geo-

metrycznymi oraz warunkami eksploatacji, które ustala się na podstawie pomiarów takich parametrów, jak: temperatura, czas, ciśnienie itp. Wyznaczone wielkości, charakteryzujące rozkład temperatur otoczenia lub powierzchni oraz ciśnienia, jak również ich przebiegi w czasie, stanowią podstawę dla założenia odpowiednich warunków brzegowych w przyjętym modelu. Następnym etapem jest przyjęcie metody i przeprowadzenie obliczeń numerycznych.

Pole temperatur w elementach cylindrycznych można, między innymi, opisać funkcjami walcowymi [1, 2, 3]. Wyznaczoną w ten sposób funkcję temperatury (T) podstawia się do równania wyrażającego potencjał termosprężystego przemieszczenia:

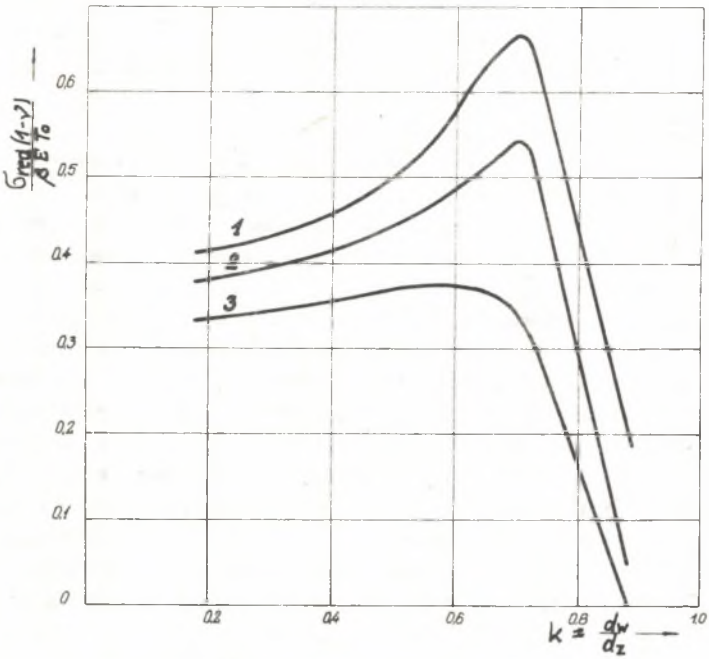
$$\Phi = \frac{1+\vartheta}{1-\vartheta}\,\beta T \tag{1}$$

na podstawie którego określa się zależności opisujące rozkłady naprężeń i odkształceń.

Stosując powyższy tok postępowania w pracach [1, 3] obliczono naprężenia w walcu z umieszczonym w osi otworem. Walec ten poddany został udarowemu nagrzewaniu i chłodzeniu na powierzchni zewnętrznej (rys. 1). Obliczona wartości zastępczych naprężeń cieplnych na powierzchni zewnętrznej walca w funkcji stosunku średnicy wewnętrznej d_w do zewnętrznej d_z wykazują, iż istnieje maksimum wytężenia na tej powierzchni dla stosunku $d_w/d_z = K \sim 0{,}7$. Przebieg krzywych (rys. 1) wskazuje na możliwość określenia takiej średnicy otworu, która zapewniłaby najkorzystniejsze warunki eksploatacji. Kryterium najmniejszych naprężeń cieplnych, w wielu przypadkach, nie może być jednak jedynym kryterium doboru geometrycznych cech obiektu. Nie można bowiem pominąć takich czynników, jak: sztywność przekroju i wytrzymałość mechaniczna tworzywa. W praktyce elementy pracujące w temperaturach podwyższonych lub zmieniających się okresowo doznają także obciążeń zewnętrznym polem siłowym. Możliwe jest również działanie szeregu innych czynników, jak np. ścieranie i korozyjne oddziaływanie ośrodka. Rozważenie w sposób wyczerpujący wszystkich czynników stanowić będzie o poprawności przyjęcia kryterium doboru cech konstrukcyjnych obiektu. W zagadnieniach równoczesnego działania obciążeń polem siłowym i temperaturowym kryterium takim może być wielkość naprężeń zastępczych w obszarach najbardziej wytężonych.

Częstokroć jednak i to kryterium jest niewystarczające dla określenia trwałości obiektu. Warunki pracy tworzywa, w przypadku działania zmiennej temperatury, jeżeli mamy do czynienia ze zmianami odkształceń w zakresie uplastycznienia przeciwzwrotnego [3], nie mogą być scharakteryzowane jedynie wielkością wytężenia. Okazuje się wówczas konieczne określenie zakresu zmian odkształceń. Mogą one stanowić kryterium trwałości.

W obiektach o względnie dużych wymiarach należy wziąć pod uwagę możliwość występowania zjawiska pękania wywołanego naprężeniami cieplnymi. Przy-



Rys. 1. Naprężenia zastępcze na powierzchni zewnętrznej walca z otworem umieszczonym w osi w funkcji ilorazu $K = \frac{d_w}{d_z}$ dla różnych liczb Fouriera (F_o). Wykresy dotyczą udarowej zmiany temperatury powierzchni walca 1 - F_o = 0,002, 2 - F_o = 0,004, 3 - F_o = 0,0075 [1]

czyną tego zjawiska mogą być wady materiałowe powstałe w procesie technologicznym. Działanie zmiennego pola temperatur w procesie zmęczenia cieplnego może również wywoływać powstawanie szczelin inicjujących pęknięcia. Proces niszczenia składa się wówczas z okresów inicjacji, wzrostu i propagacji szczeliny zmęczeniowej. Każdy z nich wymaga zastosowania, w odniesieniu do tworzywa, odmiennej metody badania. Przeniesienie wyników przeprowadzonych badań tworzywa na obiekt o określonych cechach geometrycznych możliwe jest jedynie przy pełnej charakterystyce pól temperatury, naprężeń i odkształceń cieplnych.

Badania laboratoryjne tworzywa

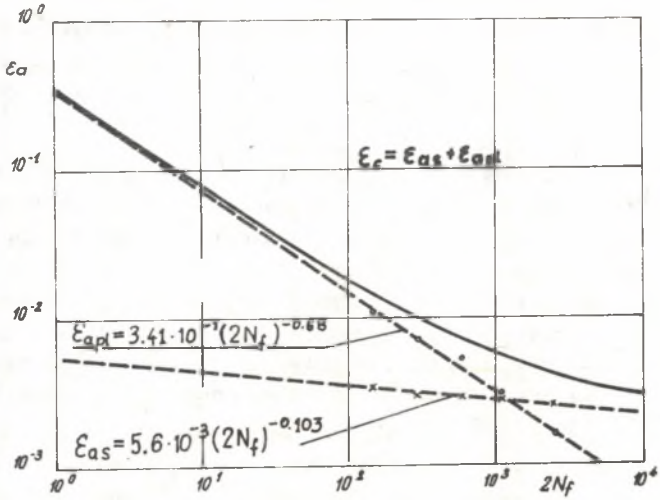
Badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli zmian obciążenia

W obliczeniach różnych układów konstrukcyjnych stosuje się coraz szerzej dane z zakresu małej liczby cykli zmian obciążenia, najczęściej do

10^4 cykli. Chodzi o małą liczbę cykli, ale przy wysokich obciążeniach roboczych, z którą nie zawsze można kojarzyć krótki okres trwałości układu lub elementu [5]. Odstępy czasowe między cyklami zmian obciążenia mogą być znaczne.

Na pełnym wykresie zmęczeniowym Wöhlera, w którym początek układu odpowiada 1/4 cyklu obciążenia, a wartość naprężenia niszczącego przy 1/4 cykla jest porównywalna z odpowiednią granicą wytrzymałości przy obciążeniu statycznym, w strefie przejściowej pomiędzy obszarami wytrzymałości zmęczeniowej przy małej liczbie cykli a ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, zaznacza się nieciągłość krzywej Wöhlera, sygnalizująca o zmianie charakteru rozwoju pęknięć i wielkości plastycznych odkształceń.

Metodyka badań w zakresie małej liczby cykli opiera się w głównej mierze na interpretacji pętli histerezy w układzie naprężenie - odkształcenie, rejestrowanych dla kolejnych, następujących po sobie, cykli obciążeń. Wynika to stąd, że odkształcenia plastyczne, będące główną przyczyną pojawiania się pętli histerezy podczas równoczesnej rejestracji naprężenia i odkształcenia, mają zasadniczy wpływ na zachowanie się materiału. Pole ograniczone pętlą jest proporcjonalne do energii rozproszonej w materiale w czasie jednego cyklu obciążenia. Zmiany charakterystycznych wielkości pętli histerezy występujące w każdym cyklu umożliwiają opis makroskopowych zmian w materiale (rys. 2).



Rys. 2. Wykresy zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli. Stal 34HNM [2]

Badania parametrów kruchego pękania

W przypadku stosowania do budowy urządzeń i konstrukcji materiałów o podwyższonej wytrzymałości, odznaczających się korzystnym zespołem własności wytrzymałościowych i plastycznych, istotnego znaczenia nabiera zagadnienie przechodzenia tych materiałów w stan kruchy, charakteryzujący ich podatność do nagłego pękania bez uprzedniego makroodkształcenia plastycznego. Występowanie tego zjawiska uwarunkowane jest oddziaływaniem wielu czynników związanych zarówno ze składem chemicznym i strukturą materiału, jak również z temperaturą oraz charakterem i szybkością działania obciążeń. W związku z tym przy badaniu własności mechanicznych stali z mikrododatkami stopowymi (stali o podwyższonej granicy plastyczności) należy zwrócić szczególną uwagę na dwa zjawiska - zmęczenie i kruche pękanie, które są ze sobą bezpośrednio powiązane i nie można ich rozpatrywać oddzielnie.

Odporność materiału na pękanie K_{Ic} wyznacza się z próby rozciągania lub zginania. Sposób przeprowadzenia próby, jak i kształt próbek jest określony normą ASTME-399-70T. W przypadku kiedy wyraźne odkształcenia plastyczne mają miejsce przed czołem pęknięcia, uważa się, że zmierzona wartość K_{Ic} nie reprezentuje krytycznej wartości K_I, jak to określa norma. Najczęściej wówczas stosowanymi kryteriami są krytyczne rozwarcie brzegów szczeliny δ_c i krytyczna wartość całki $J - J_c$.

Na podstawie wartości K_{Ic} opisuje się zjawisko rozprzestrzeniania się szczeliny w ramach liniowej mechaniki pękania. Umożliwia to odejście od zawodnych metod stosowanych dotąd w wytrzymałości materiałów do obliczeń obciążeń krytycznych, przy których następuje utrata nośności lub stateczności konstrukcji wykonanej z materiału sprężystego z koncentratorami naprężeń w postaci rys i szczelin, jakie charakteryzują każdy materiał rzeczywisty.

Duże trudności natury technicznej w przeprowadzeniu badań doświadczalnych, mających na celu wyznaczenie wartości K_{Ic} zgodnie z normą, doprowadziły do powstania innych metod określania K_{Ic} i δ_c na próbkach o mniejszych wymiarach i prostych kształtach. Jedną z nich, zasługującą na szczególną uwagę, jest metoda określania K_{Ic} na podstawie rozciągania lub zginania cylindrycznych próbek z karbem pierścieniowym przedstawiona w pracy [6].

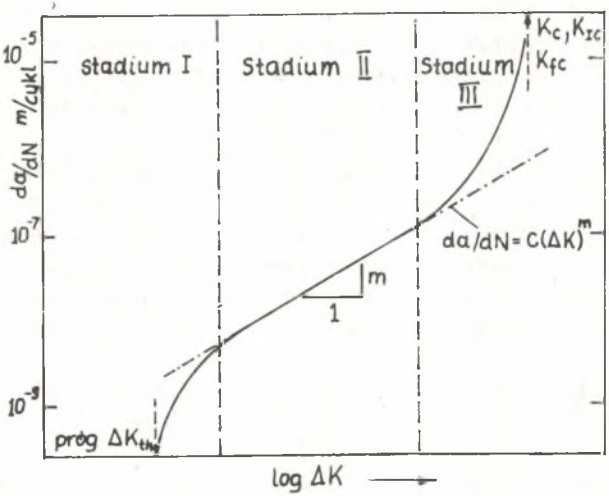
Rozwój pęknięć zmęczeniowych

Pęknięcia występujące w elementach maszyn można ogólnie podzielić na dwie grupy. Do pierwszej można zaliczyć te, których źródłem są zjawiska i zabiegi zachodzące w procesie wytwarzania i przetwarzania tworzyw, do drugiej natomiast te, które powstają w czasie eksploatacji obiektu. Niezależnie od pochodzenia, nieciągłości te podczas pracy danego urządzenia mogą

powiększać się na skutek oddziaływania zmiennego pola naprężeń i odkształceń.

Ze względów technologicznych ważna jest znajomość prędkości propagacji pęknięcia. Pozwala ona bowiem określić czas, po którym szczelina osięgnie długość krytyczną, co jednocześnie determinuje trwałość danego urządzenia. W wielu przypadkach w zagadnieniach trwałości istotną rolę będzie odgrywać odporność materiału na rozwój pęknięć. Miarą tej odporności będą charakterystyki prędkości propagacji pęknięcia określone w warunkach zbliżonych do warunków eksploatacyjnych.

Na podstawie badań laboratoryjnych można określić trzy podstawowe parametry charakteryzujące proces rozprzestrzeniania się szczeliny zmęczeniowej: progowy współczynnik intensywności naprężenia K_{th}, prędkość pękania da/dN i krytyczny współczynnik intensywności naprężenia przy obciążeniach cyklicznie zmiennych K_{fc} (rys. 3). Ze względu na charakter pracy danego urządzenia, jak i bezpieczeństwo, przy projektowaniu elementów konstrukcyjnych należy wybrać odpowiedni parametr jako wielkość kryterialną stanowiącą podstawę doboru cech geometrycznych.

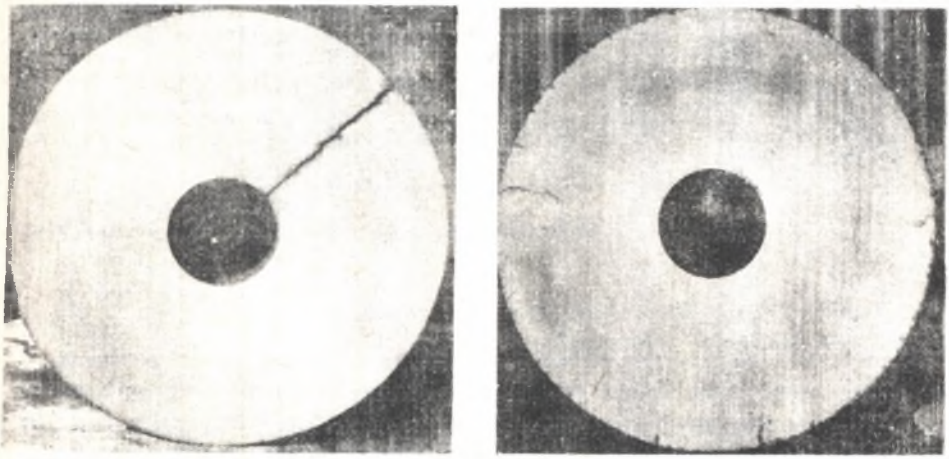


Rys. 3. Wykres zmian prędkości pęknięcia zmęczeniowego w poszczególnych stadiach rozwoju [4]

Obecnie w Instytucie Inżynierii Materiałowej prowadzone są badania charakterystyk pękania pozwalające określić wymienione parametry. Badania te dotyczą grupy stali żarowytrzymałych typu Cr-Mo-V i austenitycznych [4].

Podsumowanie

Własności określone w badaniach zmęczeniowych oraz charakterystyki odporności na pękanie determinują przydatność tworzywa dla danych warunków pracy. Kryterium doboru tworzywa musi opierać się na ocenie charakteru procesu zniszczenia, który bezpośrednio wynika z warunków eksploatacji. W niektórych przypadkach właściwym kryterium będą parametry odporności na pękanie, w innych warunkach własności zmęczeniowe (rys. 4). Wyczerpująca



Rys. 4. Trzpień pielgrzymowy po eksploatacji
a) kruche pęknięcie, b) pęknięcia zmęczeniowe na powierzchni trzpienia powstałe w wyniku działania zmian temperatury [2]

charakterystyka tworzywa przeznaczonego do pracy w warunkach działania cyklicznych zmian pola temperatury zawierać powinna dane co do wartości krytycznych współczynników K_{Ic} lub δ_c lub J_c, jak również zależności opisujące trwałość zmęczeniową w temperaturach podwyższonych. Można na tej podstawie zaprojektować obiekt o wymaganej trwałości, co wymaga uwzględnienia oprócz cech materiału również wpływu geometrycznych cech konstrukcyjnych na kryterialne stany naprężenia i odkształcenia.

W pracy [2] dokonano oceny trwałości trzpieni walcowniczych walcarek pielgrzymowych poprzez przeprowadzenie analizy stanu naprężenia i odkształcenia w walcu i porównanie wyznaczonego tym sposobem kryterialnego zakresu odkształceń z charakterystykami zmęczeniowymi tworzywa. Przeprowadzona weryfikacja doświadczalna wskazuje na poprawność zastosowanej metodyki oceny.

LITERATURA

[1] Lamber T., Okrajni J., Renowicz D.: Dobór geometrycznych cech konstrukcyjnych walców drążonych, przeznaczonych do pracy w warunkach oddziaływania zmiennych pól temperatur. ZN Pol. Śląska, Hutnictwo z.22, Gliwice 1983.

[2] Puchała M.: Ocena trwałości trzpieni pielgrzymowych ze stali 34HNM na podstawie badań małocyklicznych. Praca doktorska, Katowice 1981.

[3] Okrajni J.: Badania wpływu cyklicznych zmian pól temperatur i związanych z nimi odkształceń cieplnych na trwałość stali austenitycznych. Praca doktorska, Katowice 1982.

[4] Renowicz D.: Badanie prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w temperaturach podwyższonych przy wykorzystaniu parametrów zmęczenia krótkotrwałego stali 10H2M. Praca doktorska, Katowice 1982.

[5] Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT, Warszawa 1978.

[6] Warchoł A.: Badania wpływu odkształceń trwałych na wytrzymałość zmęczeniową ogniowych łańcuchów górniczych ze stali G25HGNM. Praca doktorska, Katowice 1982.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Andrzej Weroński

МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР

Р е з ю м е

В работе оговорены факторы, определяющие долговечность объектов под действием циклических изменений температурного поля. Предложен способ подбора геометрических конструкционных признаков цилиндра с отверстием в его оси, относительно критерия долговечности. Выделены два основных метода исследования материалов, предназначенных для элементов работающих в условиях тепловой усталостности: исследованя на усталость в диапазоне небольшого количества циклов а также исследования по сопротивляемости на растрескивание. На основе лабораторных исследований оговорен способ определения критериальных параметров разрушения. Обращено при этом внимание на возможность использования этих параметров в процессе конструирования для оценки долговечности объекта.

A METHOD OF LIFE ESTIMATION FOR CYLINDER ELEMENTS INFLUENCED BY CYCLIC TEMPERATURE CHANGES

S u m m a r y

Determinants of a life in the presente of cyclic temperature changes are described. A way of geometric choice of construction preperties for the cylinder with axial hole taking life criterien into account is presented. Two methods are proposed: the one based on fatige studies in the range of a small cycle number and the second investigating cracking resistance. A way of defining failure parameters basing on laboratory experiments is presented and attention is paid on their used in the design stange.