

Tadeusz LAMBER, Wiesław CHLADEK,  
Jerzy OKRAJNI, Donat RENOWICZ

Instytut Inżynierii Materiałowej  
Politechnika Śląska

#### BADANIA PRZYDATNOŚCI MATERIAŁU NA KOKILE ODLEWNICZE NA PRZYKŁADZIE ŻELIWA ZL25 Z DODATKIEM CYNY

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metodę oceny wytrzymałości na zmęczenie cieplne żeliwa ZL25 z dozowanymi dodatkami cyny, pod kątem ich zastosowania na kokile odlewnicze. Badania przeprowadzono w zmiennym i stałym polu temperaturowym i siłowym.

#### WPROWADZENIE

Analiza procesu zniszczenia elementów maszyn i urządzeń pracujących w podwyższonych temperaturach pozwala na stwierdzenie, że jedną z zasadniczych przyczyn tego zjawiska jest termozmęczenie materiału. W związku z tym aktualnie obserwuje się coraz większe zainteresowanie badaniami termozmęczeniowymi, które przeprowadza się w warunkach symulujących procesy występujące w materiale w czasie jego eksploatacji na obiekcie [1].

Przykładem urządzenia pracującego w szczególnie niekorzystnych warunkach jest kolila odlewnicza, której powierzchnie robocze poddawane są cyklicznym uderom cieplnym w wyniku kontaktu z ciekłym metalem. Zwiększenie trwałości kokil wymaga opracowania nowych technologii wytwarzania materiałów [2] o podwyższonej odporności na termozmęczenie oraz ustalenia właściwych kryteriów oceny tej własności.

Przyjęty w pracy sposób postępowania w trakcie przeprowadzonych badań wynika z analizy warunków pracy kokil. Uzyskane w niniejszej pracy wyniki stanowią pierwszą fazę badań, których celem jest ocena własności termozmęczeniowych żeliw stosowanych do produkcji kokil i będą podstawą do dalszych badań z uwzględnieniem wpływu innych dodatków stopowych oraz powłok ochronnych.

## BADANIA WŁASNOŚCI ŻELIWI NA KOKILE W ZALEŻNOŚCI OD TEMPERATURY

Ocena wstępna tworzywa przeznaczonego do pracy w okresowym kontakcie z ciekłym metalem powinna obejmować badania własności technologicznych oraz analizę tych wielkości fizycznych i mechanicznych, które w pierwszej kolejności decydują o wytrzymałości materiału w podwyższonej temperaturze. Wymaga to zbadania takich czynników, jak: moduł sprężystości podłużnej  $E$ , współczynnik rozszerzalności termicznej  $\beta$ , współczynnik przewodnictwa temperaturowego  $\alpha$ , temperatura przemian fazowych, oraz własności wytrzymałościowe w temperaturach podwyższonych.

Na podstawie wyników tych badań można wnioskować zachowaniu się badanego materiału pod wpływem zmiennych pól temperaturowych. Przykładowo, porównując zależności  $R_m(T)$ ,  $E(T)$ , wykresy dylatometryczne (rys. 1 i 2) oraz wpływ cyny na temperatury początku grafityzacji i przemian fazowych (rys. 3) dla żeliw o składach chemicznych podanych w tabelicy 1 możemy już wstępnie scharakteryzować te materiały pod względem odporności na zmęczenie wywołane udarami cieplnymi.

Uzyskane wyniki wskazują, że stosowanie dodatku cyny w zakresie do 0,2% nie poprawia własności wytrzymałościowych, co przy jednoczesnym wzroście modułu sprężystości podłużnej  $E$  zwiększa skłonność do powstawania pęknięć wskutek naprężeń termicznych.

Korzystnym efektem działania dodatków cyny jest przesunięcie temperatury grafityzacji w kierunku temperatur wyższych, obniża ono bowiem skłonność materiału do narastania odkształceń trwałych.

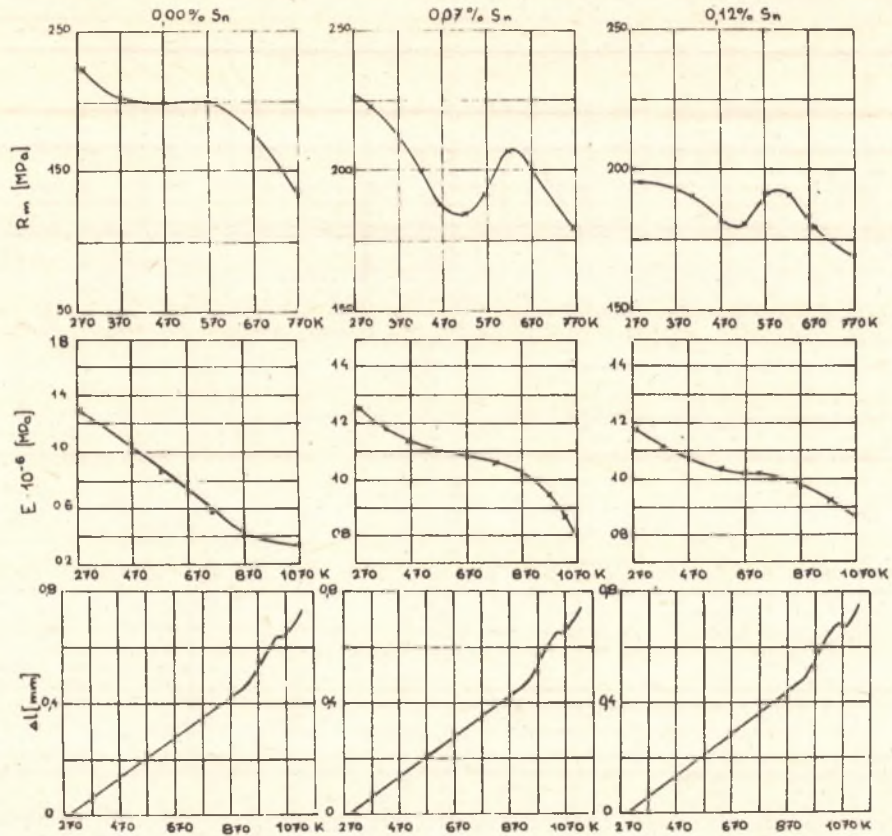
Żeliwo o zawartości cyny 0,33% wykazuje wyraźny wzrost własności wytrzymałościowych, co przy niewielkich różnicach wartości modułu sprężystości podłużnej w stosunku do pozostałych żeliw z dodatkami cyny pozwala przypuszczać, że będzie ono najlepsze do pracy w zmiennych polach temperatur.

Współczynniki rozszerzalności liniowej w zakresie temperatur pracy kokili, tj. od 940K do 1140K dla wszystkich omawianych stopów mieściły się w granicach  $13-14,5 \times 10^{-6}$  ( $\text{deg}^{-1}$ ).

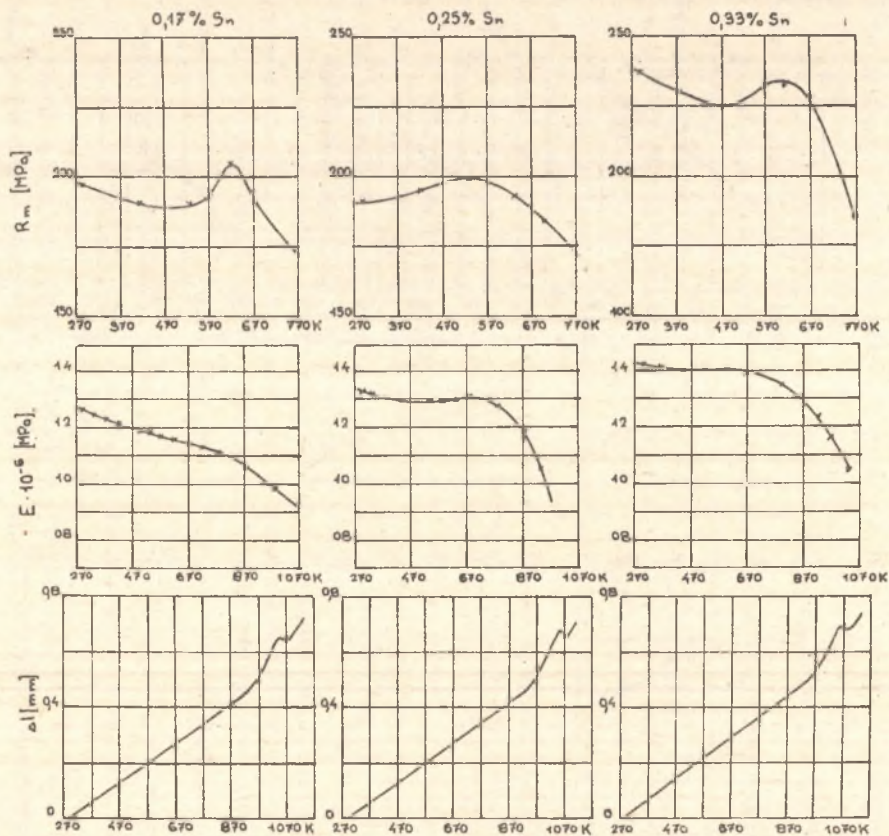
Przeprowadzona ocena wstępna pozwala wytypować żeliwa do dalszych badań, na podstawie których można będzie określić skłonność badanych materiałów do kumulacji odkształceń trwałych w podwyższonych temperaturach oraz zbadać sposób narastania pęknięć w wyniku termozmęczenia.

Metoda badania procesu kumulacji odkształceń trwałych powstałych w wyniku cyklicznie zmiennych obciążeń i temperatur

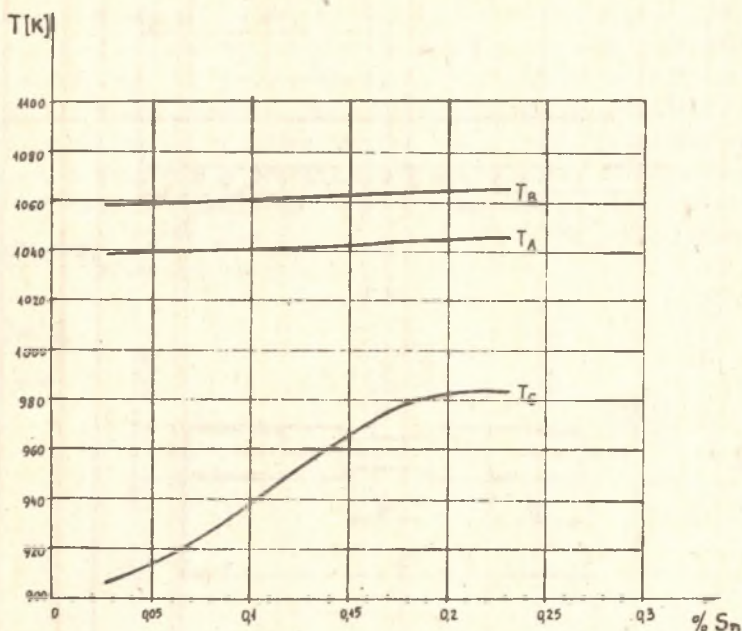
Podczas eksploatacji kokil wskutek działania zmiennych pól temperatur, w obszarach bliskich powierzchni roboczej formy, gdzie gradienty temperatur są największe, powstają odkształcenia trwałe. Cykliczne zmiany pola odkształceń powodują ich kumulację, która prowadzi do trwałych zmian w obszarach bliskich powierzchni wnętrza oraz układu wlewowego, czego wynikiem



Rys. 1. Własności mechaniczne w temperaturach podwyższonych oraz wykresy dylatometryczne dla żelii o zawartości cyny od 0 do 0.12% Sn



Rys. 2. Własności mechaniczne w temperaturach podwyższonych oraz wykresy dylatometryczne dla żeliw o zawartości cyny od 0.17 do 0.33% Sn



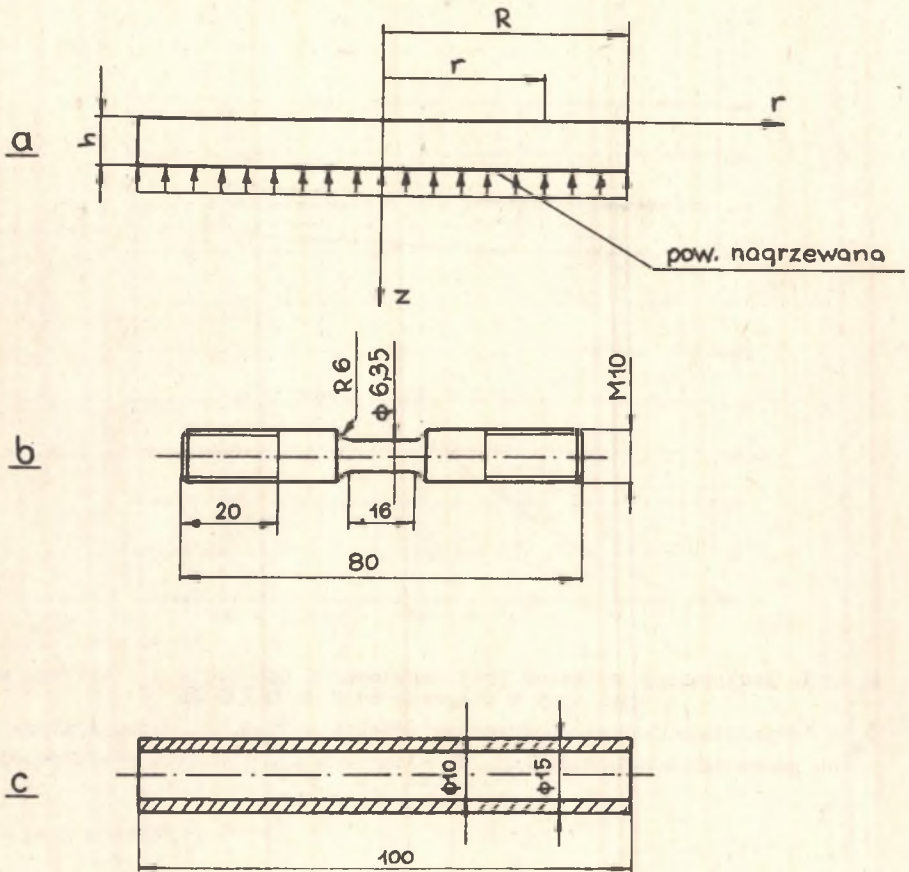
Rys. 3. Temperatury przemian przy nagrzewaniu dla żeliw z dodatkami stopowymi cyny w zakresie od 0 do 0.23% Sn

$T_A$  - temperatura początku przemiany eutektoidalnej,  $T_B$  - temperatura końca przemiany eutektoidalnej,  $T_C$  - temperatura początku grafityzacji

Tablica 1

Skład chemiczny badanych żeliw

Lp.	Zawartość pierwiastków %					
	C	Si	P	S	Mn	Sn
1	3,42	2,06	0,11	0,051	0,35	-
2	3,19	1,88	0,10	0,053	0,35	0,073
3	3,46	2,04	0,12	0,050	0,34	0,116
4	3,48	2,08	0,11	0,051	0,36	0,165
5	3,42	2,06	0,10	0,056	0,35	0,248
6	3,46	2,04	0,10	0,051	0,35	0,331



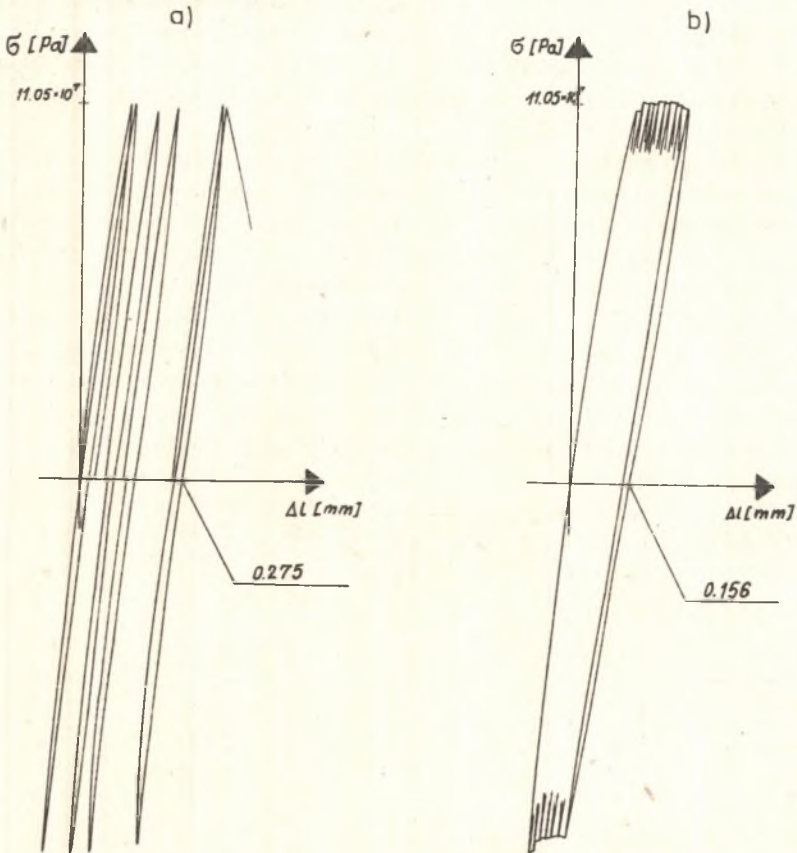
Rys. 4. Próbkki stosowane w badaniach procesu termozmęczenia:

a - próbka do badań procesu pęknięcia i propagacji szczelin w wyniku oddziaływania zmiennych pól temperatur i naprężeń, b - próbka do badań zmęczenia w podwyższonej temperaturze w zakresie małej liczby cykli, c - próbka stosowana w badaniach procesu kumulacji odkształceń wywołanych przemianami fazowymi

jest niszczenie tych powierzchni kokili. Stwierdzono, że proces kumulacji odkształceń plastycznych w przypadku działania zmiennych pól naprężeń wykazuje wiele cech wspólnych ze zjawiskiem pełzania przy obciążeniach zmiennych.

Istotnym parametrem oprócz naprężeń jest oddziaływanie temperatury. Powstanie i rozwój wewnętrznych defektów strukturalnych oraz rozpad struktury w wyniku zmian temperatury prowadzą także do niestabilności cech geometrycznych.

Zjawisko pełzania, wywołane zmiennymi obciążeniami, badano za pomocą próby zmęczenia w zakresie małej liczby cykli w podwyższonych temperaturach. Przykładową analizę zachowania się dwóch materiałów poddanych działaniu zmiennych obciążeń przeprowadzono na przykładzie żeliw 2 i 4 (tabl. 1). Kształt i wymiary używanych próbek przedstawiono na rys. 4b. Badania prowadzono na maszynie serwohydraulicznej MTS\*. Próbkę poddawano sinusoidalnie zmiennym obciążeniom mechanicznym, wywołującym naprężenia normalne wzdłuż osi próbki. Badania realizowano w komorze grzewczej przy stałej temperaturze próbki 750K oraz przy  $\sigma_m = 0$  i  $\sigma_a = 110,5$  MPa. Charakterystykę cyklu przedstawiono na rys. 5.

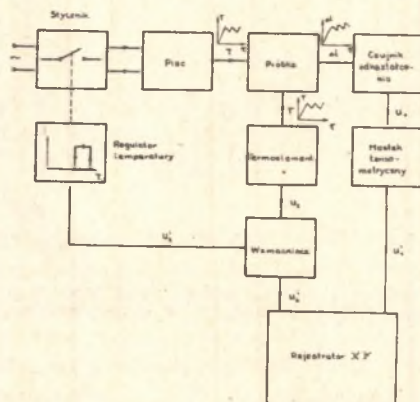


Rys. 5. Wykresy narastania odkształceń trwałych w próbce zmęczeniowej, w zakresie małej liczby cykli, w podwyższonej temperaturze

Badania wykazały, że istnieje zauważalny wpływ składników stopowych na przyrost długości pomiarowej próbki. Tak więc żeliwa, których własności omówione poprzednio różniły się nieznacznie, w tym przypadku wykazują istotne różnice. Dla stopu nr 4 przyrost długości pomiarowej  $\Delta l_{pl} = 0,156$  mm (żywność próbki  $N = 68$  cykli), dla stopu nr 2 przyrost ten wynosił  $\Delta l_{pl} = 0,275$  mm (żywność próbki  $N = 49$  cykli). We wszystkich przypadkach prędkość obciążenia była stała i wynosiła  $V = 116$  N/s. Różnica pomiędzy średnim naprężeniem niszczącym, wyznaczonym na podstawie statycznej próby rozciągania w temperaturze 750K a maksymalnym naprężeniem w próbie zmęczeniowej wynosiła  $\Delta \sigma = 41$  MPa. Przy zachowaniu takich warunków badania, w pewnym sensie można symulować warunki rzeczywistej pracy kokili. Uzyskane wyniki pozwalają jakościowo określić wpływ pierwiastków stopowych na zjawisko kumulacji odkształceń.

Badania prowadzone w celu ilościowego ujęcia zjawiska niestabilności cech geometrycznych pozwalają stwierdzić, że proces ten związany jest z narastaniem defektów strukturalnych przy cyklicznym nagrzewaniu i chłodzeniu [2], [3], [4], co wynika między innymi z nierównomiernego pola temperatur oraz anizotropii własności termofizycznych faz.

W metalach, które pracują w temperaturach bliskich temperaturom przemian fazowych, pojawiają się dodatkowe efekty związane z tymi przemianami. Wielokrotnie powtarzane przejście zakresu temperatury przemian fazowych w żeliwie szarym, prowadzące do rozpadu struktury, spowoduje zmiany strukturalne różniące się znacznie w sensie ilościowym od podobnych efektów występujących w przypadku wygrzewania tworzywa w stałej temperaturze bliskiej temperaturom przemian. Wynika stąd konieczność prowadzenia badań bardziej złożonych w porównaniu z badaniami stabilności struktury w stałej temperaturze [5].

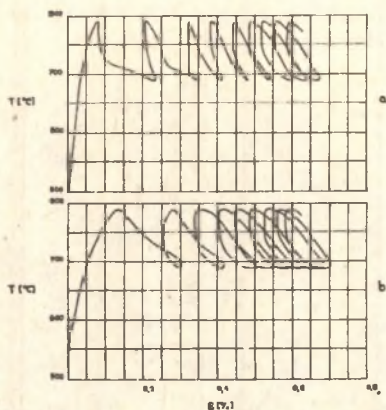


Rys. 6. Schemat blokowy urządzenia do badań kumulacji odkształceń wywołanych zmianami pola temperatur



Badanie zjawisk powodowanych dynamicznymi zmianami pola temperatur umożliwia urządzenie skonstruowane w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, którego schemat blokowy ilustruje rys. 6. Urządzenie wyposażono w układ do pomiaru temperatury oraz odkształceń. Pozwala ono badać zjawiska przyrostu wymiarów ciała przy cyklicznych zmianach temperatury.

Porównanie tworzyw pod względem kumulacji odkształceń w warunkach cyklicznego przekraczania zakresu temperatur przemian fazowych przeprowadzono na przykładzie tworzyw 3 i 4. Próbkę wykonaną z tych materiałów badano w zakresie temperatur 960-1050K, czas jednego cyklu wynosił 20 min. Efekt rozpadu struktury w podanym zakresie temperatur ilustruje rys. 7.



Rys. 7. Krzywa narastania odkształceń trwałych w próbce poddanej działaniu cyklicznie zmiennej temperatury w zakresie występowania przemian fazowych

Miarą kumulacji odkształceń jest przyrost długości próbki mierzony na odcinku pomiarowym 50 mm. Porównanie omawianych tworzyw pod względem kumulacji odkształceń wykazuje, że w tym przypadku dodatek stopowy cyny nie wpływa na stabilność wymiarów w podanym zakresie temperatur.

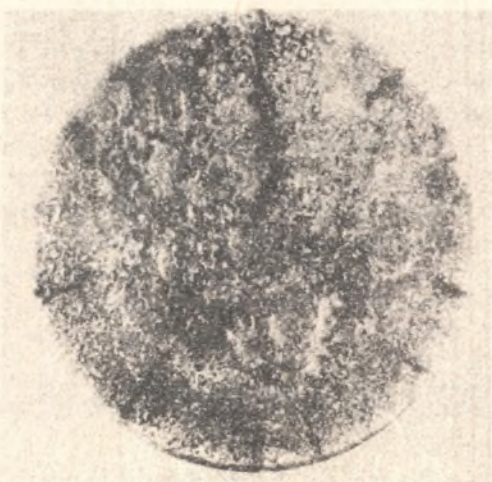
#### Badanie termozmęczenia

Określenie odporności materiału na termozmęczenie wymaga dokładnego wyznaczenia pól temperatur i naprężeń występujących w badanych próbkach. W pracy przyjęto próbkę w kształcie płytki kołowej przedstawionej na rys. 4a, dla której rozkład temperatur i naprężeń jest znany [1].

Badanie wpływu uderzeń cieplnych na powstanie i rozwój pęknięć w omawianych materiałach przeprowadzono na płytkach z żeliw 1 i 6 (tabl. 1), wykazujących największe różnice w zakresie własności ujętych we wstępnej ocenie materiału. Nagrzewanie próbki realizowano przy zastosowaniu pieca

indukcyjnego o mocy 12,7 kVA z płaskim wzbudnikiem o geometrii tak dobranej, aby uzyskać możliwie równomierny rozkład temperatury na badanej powierzchni. Kształt i wymiary wzbudnika ustalono na podstawie pomiarów temperatury dla próbki wzorcowej. Temperaturę mierzono za pomocą termopar zgrzanych z powierzchnią próbki. Nagrzewanie realizowano z szybkością 12 K/s. Mierzona różnica pomiędzy temperaturą powierzchni od strony wzbudnika a powierzchnią chłodzoną w wolnym powietrzu nie przekraczała 50 K. Gradient temperatury jest w tym przypadku niewielki, tak więc zasadnicze udary cieplne próbki nagrzanej do temperatury 890 K realizowano przy chłodzeniu poprzez kontakt powierzchni badanej z wodą. Uzyskiwane gradienty temperatur dla kolejnych cykli wahały się w granicach od 190-200 K.

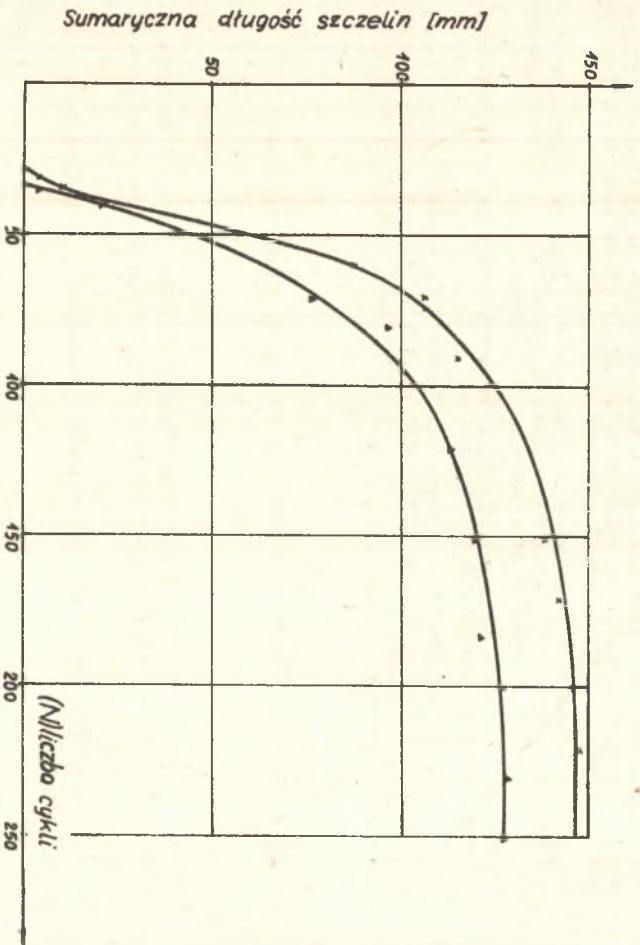
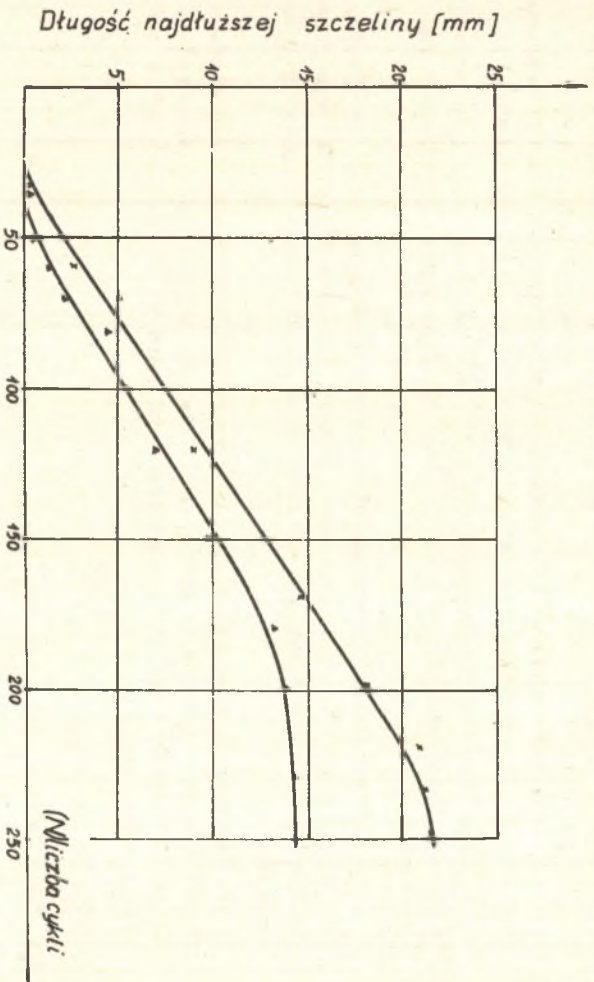
Ocenę odporności materiału na termozmęczenie przeprowadzono na podstawie pomiaru przyrostu długości powstałych szczelin. Wygląd powierzchni badanej próbki po 500 cyklach przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Zdjęcie powierzchni próbki po badaniach termozmęczeniowych

Pomiar przyrostów najdłuższej szczeliny oraz sumarycznej długości pozostałych szczelin przeprowadzono do 250 cykli, po których stwierdzono wyraźny spadek prędkości przyrostu szczeliny. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 9.

Jak widać z przedstawionych wykresów, rozwój pęknięć w żeliwie z dodatkiem cyny w ilości 0,33% był znacznie wolniejszy niż w żeliwie Z1 25.



Rys. 9. Krzywe narastania szczelin w wyniku oddziaływania uderów ciepłych

## WNIOSKI

1. Wyniki badań wielkości fizycznych i mechanicznych w funkcji temperatury umożliwiają wstępną ocenę odporności materiału na udar cieplny.
2. Kumulacja odkształceń jest nie tylko efektem zmian pola odkształceń w zakresie plastycznym lecz również zmian strukturalnych wywołanych temperaturą.
3. Badanie kumulacji odkształceń umożliwia ilościową ocenę niestabilności cech geometrycznych oraz ocenę jakości tworzywa pod kątem jego przydatności do pracy w warunkach wielokrotnego przekraczania temperatur przemian fazowych.
4. Ocena odporności materiału na termozmęczenie może być przeprowadzona na podstawie pomiaru długości najdłuższej szczeliny oraz sumarycznej długości wszystkich szczelin wywołanych zmiennym polem temperatur w zakresie małej liczby cykli.

## LITERATURA

- [1] Lamber T., Okrajni J., Chladek W., Renowicz D.: Modelowanie pól temperatur i naprężeń w kokilach żeliwnych wywołanych udarem cieplnym.
- [2] Praca badawcza Instytutu Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej: "Ocena odporności materiałów na kruche pękanie poddanych działaniu zmiennych pól temperatur". Katowice 1976.
- [3] Lamber T., Chladek W., Renowicz D., Okrajni J.: Analiza czynników decydujących o trwałości kokil wykonanych z żeliwa Z1 25. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Hutnictwo z. 15, Gliwice 1978.
- [4] Baranov A.A.: Fazovyje prevraszenia i termocyklirowanie metallov. Izdatelstvo "Naukova Dumka", Kijev 1974.
- [5] Podrzucki Cz., Ostrowski R., Gazda A.: Określenie wpływu składu chemicznego na trwałość węglików eutektoidalnych w żeliwie niskostopowym. Praca badawcza Instytutu Technologii i Mechanizacji Odlewnictwa AGH. Zakład Odlewnictwa Żeliwa. Kraków 1977.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИГОДНОСТИ ZL25 С ПРИМЕСЬЮ ОЛОВА ДЛЯ КОКИЛЬНЫХ ФОРМ

## Р е з ю м е

В работе представлен метод оценки устойчивости чугуна ZL25 с дозированной примесью олова на термическую усталость с точки зрения его пригодности для кокильных форм.

Исследования были проведены в переменном и постоянном температурном и силовом полях.

CASTING PERMANENT MOULD USABILITY TESTS ON THE EXAMPLE  
OF ZL25 WITH TIN ADDITION

S u m m a r y

The paper presents a method of estimation of temperature fatigue of ZL25 cast iron with dosed additions of tin, aiming at the iron's usability for casting permanent moulds.

The tests have been carried out in the varying and constant temperature and force field.