

Jan ADAMCZYK, Eugeniusz HAJDUCZEK,
Stefan GRINER

ODPORNOŚĆ NA CYKLICZNE ZMIANY TEMPERATURY NIEKTÓRYCH STALI NARZĘDZIOWYCH DO PRACY NA GORĄCO

Streszczenie. Zbadano wpływ warunków obróbki cieplnej, maksymalnej temperatury cykli cieplnych, a także wytapiania na odporność wybranych gatunków stali narzędziowych do pracy na gorąco na cykliczne zmiany temperatury. Stwierdzono, że największą odporność na zmęczenie cieplne wykazują stale Cr-Mo-V obrabione cieplnie w optymalnych warunkach. Stal WCL przetopiona próżniowo wykazuje nieco większą odporność na cykliczne zmiany temperatury w porównaniu z wytapioną konwencjonalnie.

1. Wstęp

Cykliczne zmiany temperatury są przyczyną przyspieszonego niszczenia powierzchni roboczych narzędzi, np. do przeróbki plastycznej metali na gorąco. Zmienne naprężenia cieplne powstające w warstwie powierzchniowej często przekraczają temperaturową wytrzymałość zmęczeniową, a niekiedy i granicę plastyczności. Powoduje to przyspieszone niszczenie powierzchni w wyniku zmęczenia cieplnego, uwidaczniające się w postaci pęknięć, siatki pęknięć i wykruszeń warstwy powierzchniowej narzędzi [1-5].

Odporność stali na cykliczne zmiany temperatury jest zagadnieniem bardzo złożonym, ponieważ wpływ na nią mają: charakter zmian pola temperatury, kształt i wielkość przedmiotu oraz jego cechy materiałowe, tj. skład chemiczny oraz obróbka cieplna i powierzchniowa [3, 6 - 9]. Naprężenia i odkształcenia cieplne zależą od rozkładu temperatury i własności fizycznych materiału, a szczególnie współczynników rozszerzalności cieplnej, przewodności i wnikania ciepła [10-12]. Wraz z naprężeniami cieplnymi spowodowanymi gradientem temperatury występują także naprężenia strukturalne, wynikające z różnic modułów sprężystości i współczynników rozszerzalności cieplnej poszczególnych faz, przemian fazowych oraz anizotropii kryształów [13, 14].

Zmienne naprężenia cieplne i strukturalne sprzyjają zarodkowaniu pęknięć zmęczeniowych, najczęściej na krawędziach powierzchniowych i w miejscach spiętrzeń naprężeń [15-17]. Zmniejszenie ilości tych krawędzi poprzez ograniczenie udziału i wielkości wtrąceń niemetalicznych jest możliwe do uzyskania metodami metalurgii pozapiecowej. Stale przetopione próżniowo lub

elektrozużłowo cechują się przy tym większą jednorodnością składu chemicznego na przekroju wlewka, równomiernym rozmieszczeniem wtrąceń niemetalicznych i węglików. W wyniku zwiększa się podatność stali do odkształceń plastycznych na gorąco, zmniejsza anizotropia własności oraz polepsza plastyczność i udarność [2, 18-20]. Wpływa to także korzystnie na zwiększenie odporności stali przetopionych próżniowo lub elektrozużłowo na tworzenie siatki pęknięć podczas cyklicznych zmian temperatury.

Celem pracy jest określenie wpływu warunków obróbki cieplnej wybranych gatunków stali narzędziowych do pracy na gorąco, wytopionych konwencjonalnie i próżniowo na pękanie w warunkach działania cyklicznych zmian temperatury.

2. Materiał do badań

Badania przeprowadzono na wybranych gatunkach stali narzędziowych do pracy na gorąco. Skład chemiczny badanych stali podano w tablicy 1. Stale WCMB i WCL wyprodukowane w Hucie Baildon dostarczono w postaci prętów o średnicy 75 mm, kutych na gorąco, natomiast stal WNL wytopioną w Hucie Stalowa Wola dostarczono w postaci kostki matrycowej o przekroju 200x200 mm. Pozostałe stale zostały przetopione w HZWD "Mikrohuta" - Huta Baildon w piecu elektrycznym łukowym przy ciśnieniu około 1 Pa. Wlewki stali przetopionych próżniowo o średnicy 200 mm poddano kuciu na gorąco na pręty o średnicy 75 mm, a następnie zmiękczeniu. Z wymienionych prętów oraz kostki matrycowej wykonano próbki do badań w postaci krążków o średnicy 70 mm i szerokości 6 mm, które następnie obrobiono cieplnie, tj. hartowano i odpuszczano. Wybrano następujące temperatury austenityzowania próbek ze stali: WNL - 860°C, WCMB - 890°C, WCL i WCLPr - 970, 1000 i 1030°C, WCLVPr - 1000, 1030 i 1060°C oraz WVCMPPr - 1090, 1120 i 1150°C. Próbki ze stali WVCMPPr austenityzowano w wymienionych temperaturach przez 0,5 godz, natomiast z pozostałych gatunków stali przez 1 godz, po czym chłodzono w oleju. Próbki zahartowane poddano dwukrotnemu odpuszczaniu w temperaturach 500, 550, 600 i 650°C przez 2 godziny za wyjątkiem próbek ze stali WNL i WCMB, które odpuszczano w wymienionych temperaturach jednokrotnie. W celu usunięcia warstwy odwęglonej i utlenionej krążki po zakończeniu obróbki cieplnej szlifowano na średnicę 69 mm.

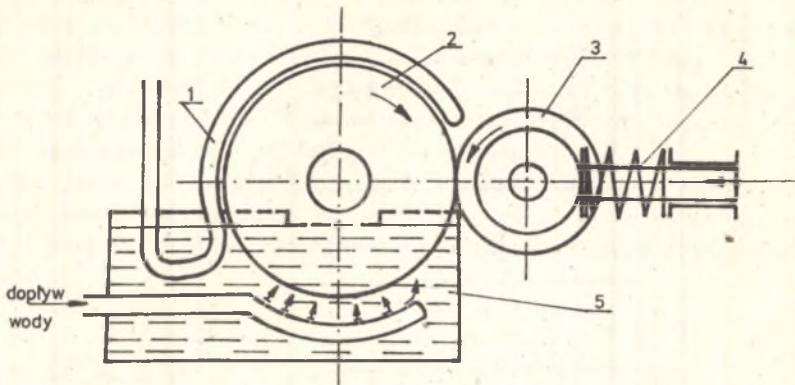
3. Przebieg badań

Badania odporności stali na pękanie, przy cyklicznych zmianach temperatury przeprowadzono metodą porównawczą na stanowisku umożliwiającym realizowanie cyklicznych zmian temperatury w powierzchniowej warstwie próbki przy jednoczesnym działaniu nacisku powierzchniowego [21] (rys. 1). Po-

Tablica 1

Skład chemiczny badanych stali

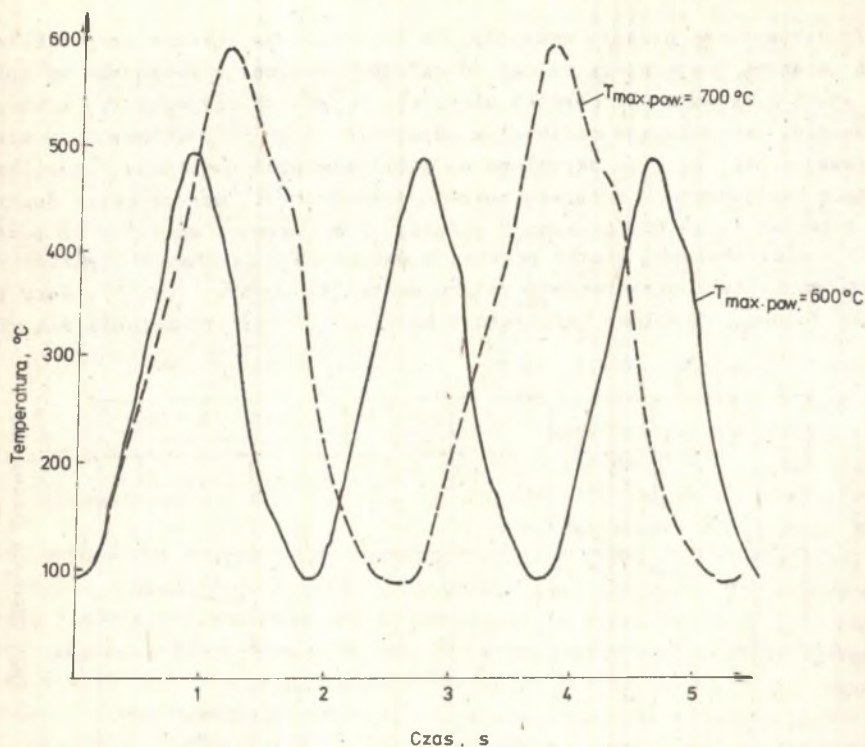
Gatunek stali	Zawartość składników, %													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	B	Co	O ₂ ppm	N ₂ ppm
WNL	0,55	0,70	0,23	0,015	0,015	0,72	1,61	0,25						
WCMB	0,38	1,39	0,23	0,014	0,014	2,43	0,17	0,42	0,10		0,003		60	210
WCL	0,44	0,49	0,97	0,016	0,012	5,06	0,09	1,28	0,50					
WCLPr	0,38	0,43	0,81	0,015	0,014	5,41	0,23	1,35	0,44				10	165
WCLVPr	0,45	0,42	1,04	0,018	0,020	5,10	0,12	1,38	1,02				30	130
WVCMPr	0,40	0,40	0,29	0,017	0,020	4,30	0,28	1,67	1,48	2,80	0,05	1,68	15	180



Rys. 1. Schemat urządzenia do badania odporności stali na cykliczne zmiany temperatury:

1 - induktor, 2 - próbka badana, 3 - rolka dociskowa, 4 - sprężyna dociskająca, 5 - zbiornik przelewowy z wodą chłodzącą

wierzchnie walcowe próbek obracających się w czasie badania nagrzewano indukcyjnie za pomocą wzbudnika zasilanego z generatora GIS-10 o mocy maksymalnej 10 kW i częstotliwości prądu około 400 kHz. Prędkość obrotowa próbek wynosiła 28, 20 lub 8 obr/min, zapewniając nagrzewanie ich powierzchni walcowych do maksymalnej temperatury cyklu odpowiednio 600, 700 lub 850°C. Obracające się próbki chłodzono wodą bieżącą o intensywności przepływu tak dobranej, aby temperatura wody odpływającej wynosiła około 30°C, a temperatura powierzchni próbki obniżyła się do około 100°C. Podczas badania odporności próbek na cykliczne zmiany temperatury z dodatkowym naciskiem powierzchniowym, stosowano układ umożliwiający realizowanie zadanego nacisku bezpośrednio na strefę nagrzewania. Układ ten składa się z rolki dociskowej, która oddziaływa na badany krążek z siłą zadaną przez odpowiednie ugięcie sprężyny. Wielkość siły dociskowej obliczono z zależności Hertza dla przypadku styku dwóch powierzchni walcowych. Badania odporności stali na cykliczne zmiany temperatury przeprowadzono na trzech próbkach dla każdego stanu obróbki cieplnej. Temperaturę powierzchni próbki sprawdzono wskaźnikami termokolorowymi oraz termoparą stykową. Zmiany temperatury w warstwie powierzchniowej próbki (rys. 2) zarejestrowano podczas cyklu cieplnego przy wykorzystaniu termopary przyspawanej do próbki na głębokości około 0,3 mm pod powierzchnią nagrzewaną. Liczba cykli cieplnych podczas badań odporności stali na cykliczne zmiany temperatury wynosiła 3000 lub 5000. W celu usunięcia warstwy tlenków i soli mineralnych, po zakończeniu próby na stanowisku badawczym krążki trawiono w 20% wodnym roztworze HCl z dodatkiem 0,2% inhibitora. Na próbkach poddanych cyklicznym zmianom temperatury oceniono głębokość i gęstość pęknięć. Głębokość



Rys. 2. Przebieg zmian temperatury w odległości ok. 0,3 mm od powierzchni próbek podczas cykli cieplnych

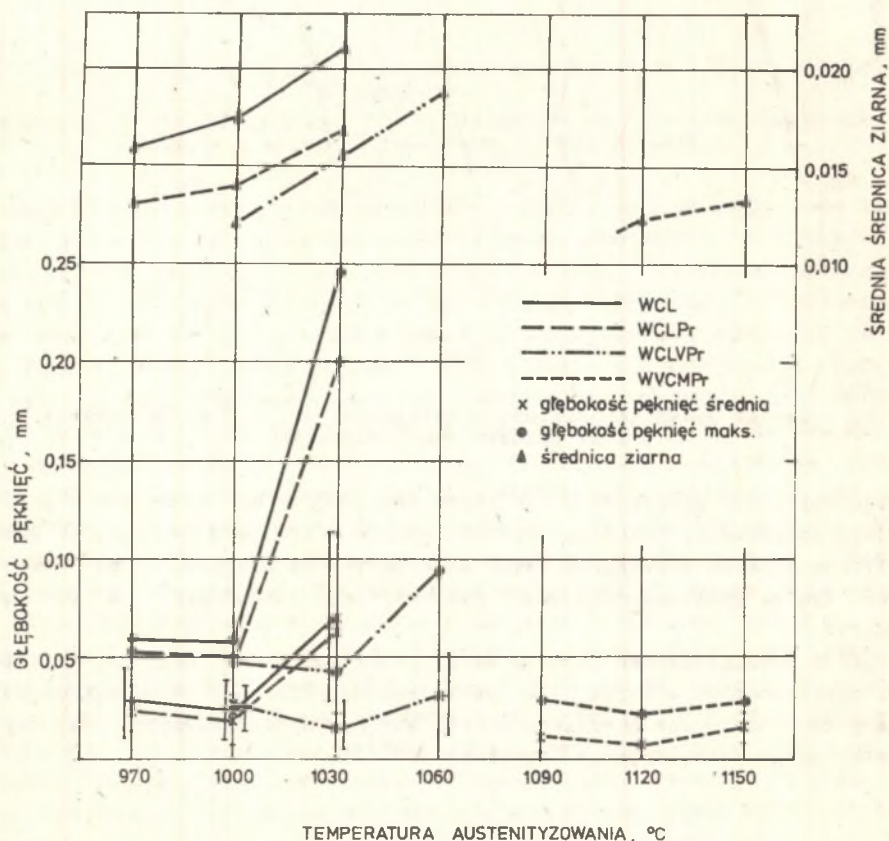
pęknięć zmierzono na zglądach wyciętych prostopadle do osi krążka w połowie jego szerokości, natomiast gęstość pęknięć określono wyznaczając średnią liczbę pęknięć powierzchniowych utworzonych na długości 1 mm obwodu próbki. Wyniki pomiarów opracowano statystycznie zakładając ich rozkład normalny.

Ponadto przeprowadzono badania metalograficzne na mikroskopie świetlnym i elektronowym, badania dylatometryczne na dylatometrze bezwzględny, pomiary twardości oraz określono udział wtrąceń niemetalicznych przy użyciu mikroskopu telewizyjnego Quantimet 720^{x)}.

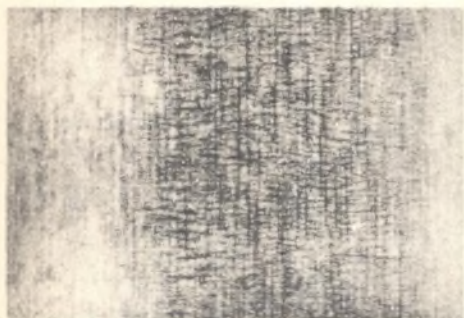
x) Udział wtrąceń niemetalicznych określono w Instytucie Metalurgii Politechniki Śląskiej

4. Wyniki badań i ich omówienie

Przeprowadzone badania wykazały, że odporność na pękanie przy cyklicznych zmianach temperatury zależy od składu chemicznego i sposobu wytapiania stali oraz warunków obróbki cieplnej. Optymalne temperatury austenityzowania, zapewniające maksymalną odporność stali na powstawanie powierzchniowej siatki pęknięć określono na podstawie prób zmęczenia cieplnego krążków hartowanych z badanego zakresu temperatur i odpuszczonych dwukrotnie w temperaturze 600°C przez 2 godziny. Stwierdzono, że wpływ na powstawanie powierzchniowej siatki pęknięć w warunkach działania cyklicznych zmian temperatury wywiera temperatura austenityzowania (rys. 3). Jako kryterium doboru optymalnej temperatury hartowania przyjęto najmniejszą głą-



Rys. 3. Wpływ temperatury austenityzowania stali na średnią średnicę pierwotnego ziarna austenitu oraz średnią i maksymalną głębokość pęknięć w próbkach zahartowanych, odpuszczonych dwukrotnie w 600°C i poddanych działaniu 5000 cykli zmian temperatury w zakresie $600\text{--}100^{\circ}\text{C}$



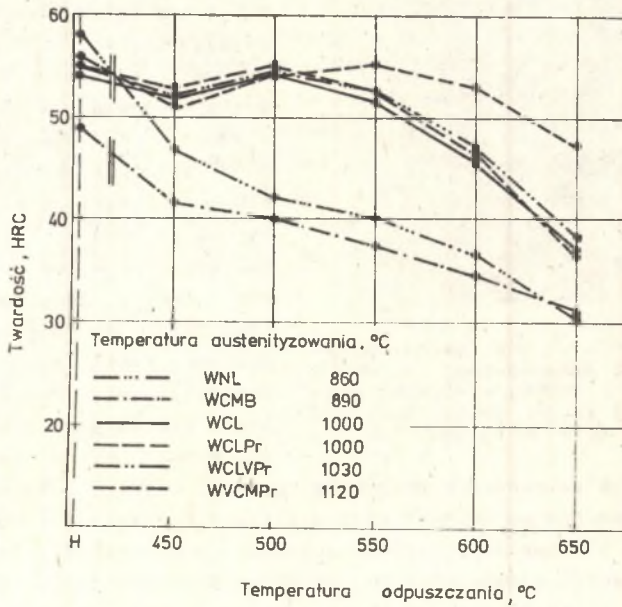
Rys. 4. Pęknięcia na powierzchni próbki ze stali WCL zahartowanej z 1000°C i odpuszczonej w 600°C , utworzone podczas 5000 cykli zmian temperatury w zakresie $600-100^{\circ}\text{C}$; pow. 30x

bokość pęknięć po 5000 cykli cieplnych w zakresie temperatur $600 - 100^{\circ}\text{C}$. Największą odporność na cykliczne zmiany temperatury wykazują stale: WVCMPr po austenitowaniu w 1120°C , WCLVPr - po austenitowaniu w 1030°C , a WCL i WCLPr - po austenitowaniu w 1000°C . Próbki obrabione cieplnie w wymienionych warunkach wykazują po 5000 cykli cieplnych w zakresie $600 - 100^{\circ}\text{C}$ bardzo gęstą siatkę drobnych pęknięć (rys. 4) o głębokości $0,02$ do $0,06$ mm. Wyższe temperatury austenitowania sprzyjają rozrostowi ziarna austenitu pierwotnego, szczególnie w stali WCL,

WCLPr i WCLVPr i zwiększeniu głębokości pęknięć (rys. 3). Wskazuje to, że maksymalną odporność na pękanie przy cyklicznych zmianach temperatury wykazują stale o stosunkowo wysokiej twardości, a w szczególności: stale WCLVPr, WCLPr i WCL o twardości ok. 47 HRC, natomiast stal WVCMPr o twardości ok. 53 HRC, przy zachowaniu pierwotnego ziarna austenitu o średniej średnicy od ok. $0,012$ do $0,017$ mm, tj. o wielkości odpowiadającej nr 9 wg PN-66/H-04507. Austenitowanie stali WVCMPr w zakresie temperatur $1090 - 1150^{\circ}\text{C}$ wpływa nieznacznie na głębokość pęknięć ze względu na małe zmiany wielkości ziarna austenitu pierwotnego (rys. 3).

Odpuszczanie w zakresie temperatur od 500 do 650°C oddziaływa na strukturę i własności wytrzymałościowe stali oraz na pękanie w warunkach cyklicznych zmian temperatury. Stale WVCMPr, WCLVPr, WCLPr i WCL wykazują maksymalną odporność na zmęczenie cieplne po odpuszczaniu w temperaturze 600°C , tj. ok. 50 do 100°C wyższej od zapewniającej twardość maksymalną (rys. 5 i 6). Odpuszczanie w temperaturach wyższych od optymalnej prowadzi do zmniejszenia twardości i odporności stali na tworzenie siatki pęknięć (rys. 5 i 6).

Inicjacja pęknięć w przeważającej liczbie przypadków zachodzi na granicach ziarna austenitu pierwotnego (rys. 7) oraz na wtrąceniach niemetalicznych (rys. 8). Znaczna ilość wtrąceń niemetalicznych (rys. 9), duża wartość współczynnika rozszerzalności liniowej (tabl. 2) oraz niskie własności wytrzymałościowe (rys. 5) są przyczyną zmniejszonej odporności stali WCMB na cykliczne zmiany temperatury (rys. 6). Stale chromowo-molibdenowe WCL, WCLPr i WCLVPr oraz stal wieloskładnikowa WVCMPr cechują się dużą odpornością na tworzenie siatki pęknięć powierzchniowych z uwagi na odporność na odpuszczanie i zachowanie wysokich własności wytrzymałościowo-

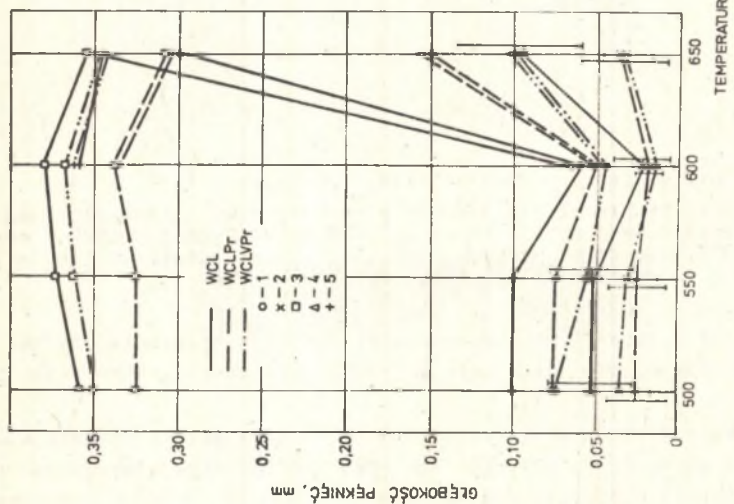
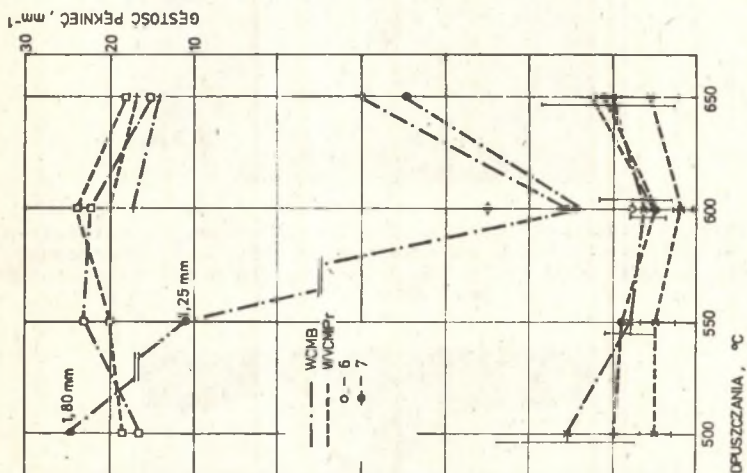


Rys. 5. Wpływ temperatury odpuszczania na twardość badanych stali zahartowanych z optymalnych temperatur

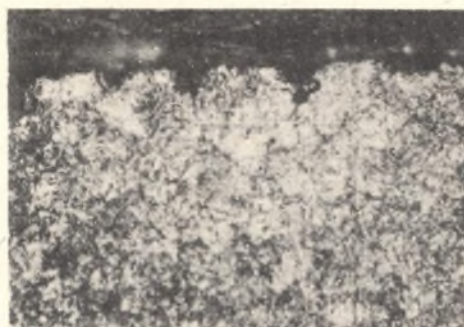
Tablica 2

Temperatury przemian fazowych badanych stali oraz średnie współczynniki rozszerzalności liniowej w zakresie 20-600°C

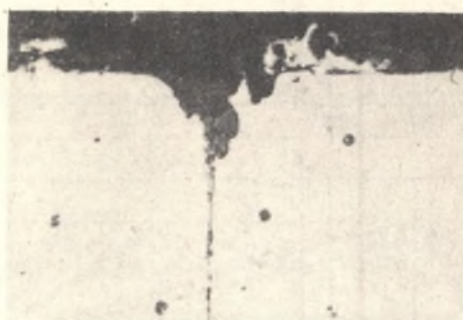
Gatunek stali	Temperatury przemian fazowych, °C		Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej $\alpha_{20}^{600} \cdot 10^{-6}, 1/^{\circ}\text{C}$
	A_{c1D}	A_{c1K}	
WNL	720	775	14,12
WCMB	725	790	14,92
WCL	810	860	14,43
WCLPr	810	855	14,04
WCLVPr	820	870	14,00
WVCMPPr	830	>1050	13,15



Rys. 6. Wpływ temperatury odpuszczania na gęstość oraz średnią i maksymalną głębokość pęknięć powierzchniowych w badanych stalach obrabionych cieplnie i poddanych działaniu 5000 (stale WCL, WCLPr, WCLVPr i WVCMPr) lub 3000 (stal WCMB) cykli zmian temperatury w zakresie 600 - 1000°C:
 1 - 2 odpowiednio maksymalna i średnia głębokość pęknięć, 3 - gęstość pęknięć, 4 i 5 - odpowiednio maksymalna głębokość i gęstość pęknięć po próbie z dodatkowym naciskiem ok. 100 MPa, 6 i 7 - odpowiednio średnia i maksymalna głębokość pęknięć w stali WCMB po 5000 cykli cieplnych



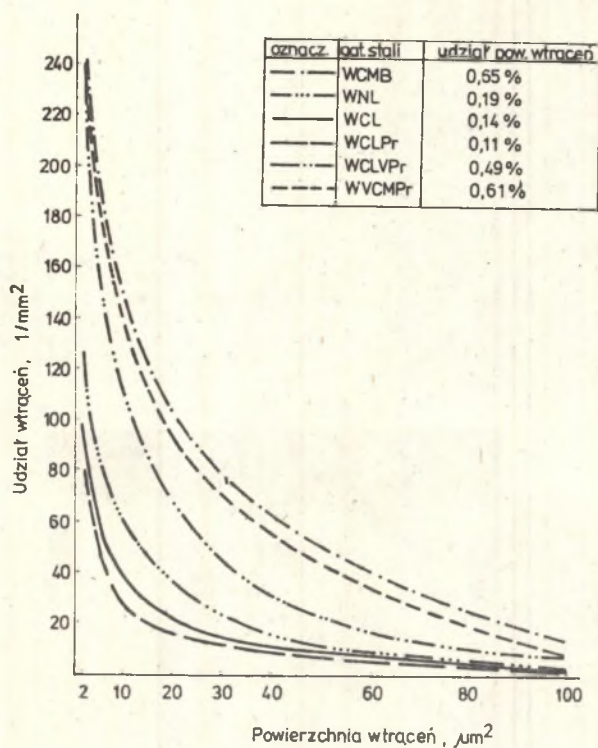
Rys. 7. Pęknięcia na granicach ziarn austenitu pierwotnego w warstwie powierzchniowej próbki ze stali WCL zahartowanej z 1000°C i odpuszczonej w 600°C , utworzone podczas 5000 cykli zmian temperatury w zakresie $600\text{--}100^{\circ}\text{C}$, pow. 450x



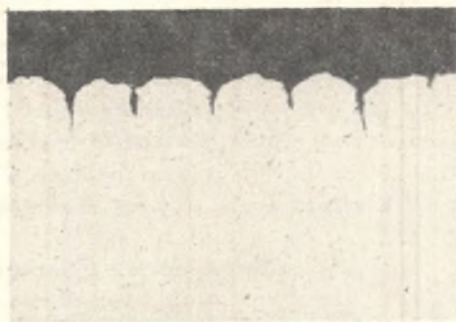
Rys. 8. Pęknięcie rozprzestrzeniające się od wtrącenia niemetalicznego w warstwie powierzchniowej próbki ze stali WCMB zahartowanej z 890° i odpuszczonej w 500°C , utworzone podczas 3000 cykli zmian temperatury w zakresie $600\text{--}100^{\circ}\text{C}$, pow. 360x

wych, mniejszy współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz mniejszy udział wtrąceń niemetalicznych w porównaniu ze stalą niskostopową WCMB (tablica 2, rys. 5, 6, 9).

Stal WCL przetopiona próżniowo, w porównaniu z wytopioną konwencjonalnie wykazuje o około 20 do 30% mniejszą głębokość pęknięć utworzonych podczas prób zmęczenia cieplnego przeprowadzonych w tych samych warunkach (rys. 6). Wiąże się to niewątpliwie z większą jednorodnością struktury, mniejszym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej (tablica 2) oraz ograniczonym stężeniem gazów (tablica 1) i nieco mniejszą ilością wtrąceń niemetalicznych (rys. 9) w stali przetopionej próżniowo.



Rys. 9. Udział wtrąceń niemetalicznych w badanych stalach

Rys. 10. Pęknięcia w warstwie powierzchniowej próbki ze stali WVCMPPr za-
hartowanej z 1120°C i odpuszczonej w 600°C, utworzone podczas 5000 cykli
zmian temperatury w zakresie 700-100°C, pow. 360x



Rys. 11. Pęknięcie po granicach ziarn austenitu pierwotnego w próbce ze stali WCMB zahartowanej z 890°C i odpuszczonej w 500°C , utworzone podczas 3000 cykli zmian temperatury w zakresie $600\text{--}100^{\circ}\text{C}$, pow. $360\times$



Rys. 12. Pęknięcia oraz wykruszenia warstwy powierzchniowej próbki ze stali WCL zahartowanej z 1000°C i odpuszczonej w 550°C , utworzone podczas 5000 cykli zmian temperatury w zakresie $600\text{--}100^{\circ}\text{C}$, pow. $360\times$

Propagacja pęknięć podczas cyklicznych zmian temperatury następuje początkowo prostopadle do powierzchni nagrzewanej próbek (rys. 8 i 10), a następnie po granicach ziarn austenitu pierwotnego (rys. 11). Powoduje to często wykruszanie się warstwy powierzchniowej stali (rys. 12). Gęstość siatki pęknięć na powierzchni próbek jest na ogół większa w przypadku gdy ich maksymalna głębokość jest mała. Głębsze pęknięcia występują zazwyczaj na powierzchniach próbek wykazujących słabiej rozwiniętą siatkę pęknięć (rys. 4, 6).

Cykle cieplne są przyczyną zmian struktury w warstwie powierzchniowej próbek. Stwierdzono, że stale zahartowane i odpuszczone w warunkach zapewniających maksymalną odporność na pękanie przy cyklicznych zmianach temperatury wykazują strukturę martenzytu odpuszczonego z dyspersyjnymi węglnikami stopowymi: w stali WVCMPr - M_4C_3 , M_2C i M_3C (rys. 13), w stalach WCLVPr, WCLPr i WCL - M_3C i M_4C_3 (rys. 14), a w stali WCMB - M_3C (rys. 15). Cykliczne nagrzewanie i chłodzenie podczas próby zmęczenia cieplnego powo-



Rys. 13. Struktura stali WVCMPr zahartowanej z 1120°C i odpuszczonej w 600°C: martenzyt odpuszczony z wydzieleniami węglików M_3C , M_4C_3 i M_2C oraz węglikiem nie rozpuszczonym podczas austenitowania, pow. 18500 x

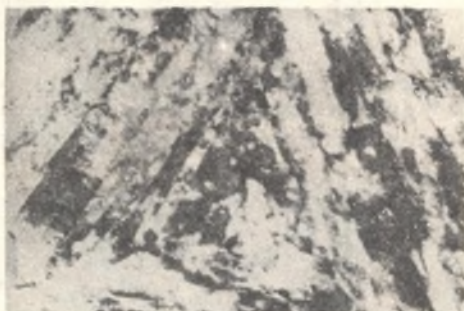


Rys. 14. Struktura stali WCL zahartowanej z 1000°C i odpuszczonej w 600°C martenzyt odpuszczony z wydzieleniami węglików M_3C i M_4C_3 , pow. 13500x



Rys. 15. Struktura stali WCMB zahartowanej z 890°C i odpuszczonej w 600°C: płytkowe i ziarniste wydzielenia cementytu stopowego w osnowie martenzytu odpuszczonego, pow. 18500x

duje dalszy rozpad martenzytu o intensywności zwiększającej się z podwyższeniem temperatury maksymalnej cyklu. W stalach średnio i wysokostopowych następuje przy tym częściowe rozpuszczenie cementytu stopowego i wzrost wydzieleni węglików bardziej stabilnych, tj. MC i M_2C , natomiast w stalach niskostopowych WCMB i WNL - koagulacja wydzieleni M_3C . Jednocześnie z przemianami fazowymi i wzrostem węglików przebiega zdrowienie osnowy stali (rys. 16). Zmiany strukturalne spowodowane cyklicznymi zmianami temperatury prowadzą do zmniejszenia twardości warstwy powierzchniowej (tablica 3) oraz ułatwienia propagacji pęknięć. Zaznacza się to wyraźnie z pod-



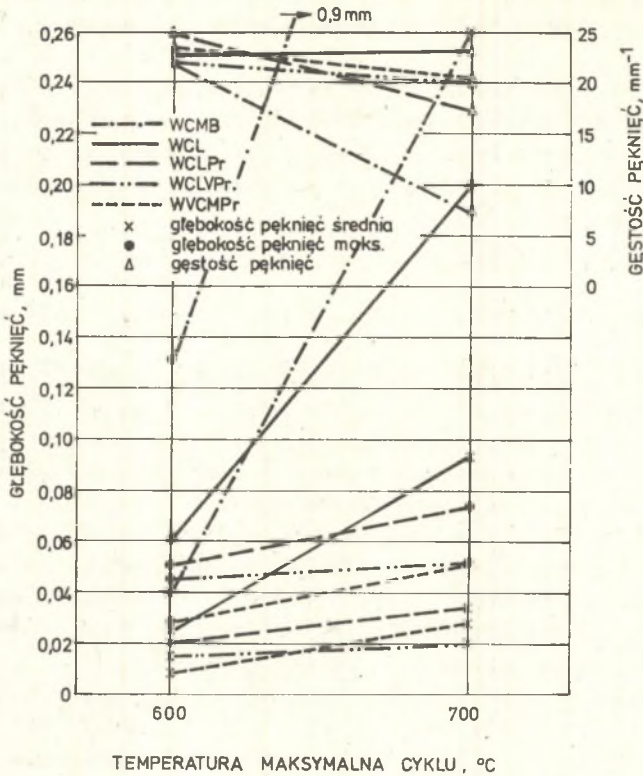
Rys. 16. Struktura w odległości ok. 0,3 mm od powierzchni nagrzewanej próbki ze stali WCLPr zahartowanej z $1000^{\circ}C$ i odpuszczonej w $600^{\circ}C$, a następnie poddanej 5000 cykli zmian temperatury w zakresie $600-100^{\circ}C$: ziarniste wydzielenia węglików M_3C i M_4C_3 głównie na granicach ziarn martenzytu odpuszczonego, pow. 18500x

Tablica 3

Twardość stali w odległości około 0,2 mm od powierzchni nagrzewanej, mierzona przed i po próbie zmęczenia cieplnego

Gatunek stali	Twardość, HRC			
	obrobionej cieplnie	po 5000 cykli z temperaturą maksymalną: $^{\circ}C$		
		600	700	850
WNL	40			19 ^x
WCMB	34,5	28	20	
WCL	45,5	39	36	29
WCLPr	46,5	40	36	
WCLVPr	47	40	36	31
WVCMPPr	53	45	40	

^xpo 1000 cykli cieplnych.



Rys. 17. Wpływ temperatury maksymalnej cyklu cieplnego na gęstość oraz średnią i maksymalną głębokość pęknięć utworzonych podczas 5000 cykli zmian temperatury w warstwie powierzchniowej próbek z badanych stali obrabianych cieplnie w optymalnych warunkach

wyższeniem temperatury maksymalnej cykli cieplnych występowaniem pęknięć o większej głębokości i mniejszej gęstości (rys. 17). Podwyższenie temperatury maksymalnej cykli do około 850°C powoduje bardzo szybki przyrost głębokości pęknięć, gdyż wtedy podczas cyklu cieplnego istnieje możliwość przebiegu przemiany $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, zwłaszcza w stalach o niskiej temperaturze A_1 , tj. WCMB i WNL (tablica 2). Stąd w stali WNL podczas 1000 cykli cieplnych w zakresie $850 - 100^{\circ}\text{C}$ powstają pęknięcia o głębokości do około 0,8 mm, podczas gdy w stali WCL badanej w tych samych warunkach, pęknięcia o takiej głębokości ujawnione dopiero po pięciokrotnie większej liczbie cykli zmian temperatury. Należy jednak zaznaczyć, że stosunek głębokości pęknięć utworzonych w próbkach z dwóch różnych stali badanych w tych samych warunkach nie może stanowić kryterium bezwzględnej oceny odporności tych stali na tworzenie powierzchniowej siatki pęknięć. Wynika to stąd, że roz-

wój pęknięć o zróżnicowanej głębokości w warunkach nagrzewania indukcyjnego zachodzi z różną prędkością. Pęknięcia o większej głębokości rosną szybciej wskutek silniejszego zagęszczenia prądów wirowych na ich wierzchołkach.

Nacisk około 100 MPa wywierany na powierzchnię nagrzewaną próbek nieco przyspiesza rozwój pęknięć powierzchniowych przy jednoczesnym zmniejszeniu ich zagęszczenia (rys. 6). Może to być związane z utrudnionym zarodkowaniem pęknięć wskutek wygładzania nierówności powierzchniowych przez rolę dociskową.

5. Wnioski

Odporność stali na tworzenie powierzchniowej siatki pęknięć przy cyklicznych zmianach temperatury zależy głównie od składu chemicznego, decydującego o temperaturach przemian fazowych, współczynnika rozszerzalności cieplnej i odporności na odpuszczanie, a także od warunków obróbki cieplnej i sposobu wytapiania. Największą odporność na pękanie w badanych warunkach wykazują stale cechujące się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi i temperaturami przemian fazowych, małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej i niewielką ilością wtrąceń niemetalicznych, tj. stal WVCMPr przy cyklach cieplnych w zakresie 600–100°C oraz stale WCLVPr i WVCMPr przy cyklach cieplnych w zakresie 700–100°C.

Optymalnymi warunkami obróbki cieplnej są: hartowanie stali WVCMPr z 1120°C, WCLVPr z 1030°C, WCL i WCLPr z 1000°C, a WCMB z 890°C w oleju oraz odpuszczanie w 600°C, natomiast stali WNL - hartowanie z 860°C w oleju i odpuszczanie w 550°C.

Zarodkowanie pęknięć powierzchniowych następuje przede wszystkim na granicach ziarn austenitu pierwotnego oraz wtrąceniach niemetalicznych, a ich rozprzestrzenianie zachodzi początkowo zgodnie z gradientem temperatury, tj. prostopadle do powierzchni nagrzewanej, a następnie po granicach ziarn byłego austenitu prowadząc do wykruszeń warstwy powierzchniowej.

Przetapianie próżniowe powoduje zwiększenie czystości stali i jednorodności jej struktury, stąd stal WCL przetopiona próżniowo wykazuje pęknięcia o głębokości o około 25% mniejszej w porównaniu z wytopioną konwencjonalnie.

Nacisk powierzchniowy o wielkości około 100 MPa wywierany na powierzchnię nagrzaną próbek w czasie badania zmęczenia cieplnego powoduje niewielki wzrost głębokości pęknięć.

LITERATURA

- [1] Rousseau D., Riegert J.P., Seraphin L., Tricot R.: *Revue de Metalurgie*, 72, 1975, 12, s. 875.
- [2] Rostoker W.: *Journal of Materials*, 4, 1969, 1, s. 117.
- [3] Żmihorski E., Żółciak T.: *Metaloznawstwo i Obróbka Ciepła*, 3, 1973, s. 2.
- [4] Sharan K., Saksena N.P.: *EML Techn. J.*, 17, 1975, 1-2, s. 10.
- [5] Kanappan A.: *Metal Forming*, 36, 1969, 12, s. 335.
- [6] Prowans S., Ustasiak M.: *Hutnik*, 39, 1972, 10, s. 479.
- [7] Rauzina J.J., Zabieziński A.J., Szejn A.S.: *Miet. i Tiern. Obr. Miet.*, 1973, 11, s. 20.
- [8] Gieller J.A., Gołubiewa J.S.: *Izw. W.U.Z. Człorn. Miet.*, 7, 1964, 9, s. 148.
- [9] Stiepanowicz A.D., Nikołajew W.J., Szulgin W.F.: *Miet. i Tiern. Obr. Miet.*, 1975, 3, s. 48.
- [10] Serensen S.W., Dulniew R.A.: *Zaw. Łab.*, 30, 1964, 4, s. 468.
- [11] Taira S., Inoue T.: *Thermal Stresses and Thermal Fatigue*, Proc. of the Int. Conf., Sept. 1969, Berkeley; Butterworths, London 1971, s. 66.
- [12] Carden A.E.: *Proc. ASTM*, 63, 1963, s. 735.
- [13] Kucharski K., Wendorff Z.: *Archiwum Hutnictwa* 20, 1975, 1, s. 49.
- [14] Brooksbank D., Andrews K.W.: *J. Iron Steel Inst.* 210, 1972, s. 246.
- [15] Yokobori T.: *Fizika i mechanika razruszenija i procznosti twierdych tież*, *Mietalurgija*, Moskwa 1971.
- [16] Barnby J.T., Bayliss R.N.: *Metal Forming*, 36, 1969, 6, s. 157.
- [17] Vodšedalek J.: *The 4-th Inst. Symp. on Heat. Resistant Metallic Materials*, 1971, s. 239.
- [18] Becker H.J.: *Zeit. wirtsch. Fertig.*, 68, 1973, 10, s. 530.
- [19] Miśta S., Sułkowski J., Szwejk H.: *Materiały Narady Technicznej nt. "Stale narzędziowe"*, Huta Baildon, Katowice 1979.
- [20] Philip T.V.: *Metals Technol.*, 2, 1975, 12, s. 554.
- [21] Adamczyk J., Griner S., Dobrzański L., Hajduczek E.: *Pat. PRL nr 195055*.

СТОЙКОСТЬ К ЦИКЛИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ
НЕКОТОРЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ
ДЛЯ РАБОТЫ В ГОРЯЧЕМ СОСТОЯНИИ

Р е з ю м е

Было испытано влияние условий термообработки, максимальной температуры термических циклов, а также способа плавки на стойкость к циклическим изменениям температуры избранных сортов инструментальных сталей предназначенных для работы в горячем состоянии.

Было установлено, что самой высокой стойкостью к термической усталости обладают стали Cr-Mo-V подверженные термообработке при оптимальных режимах.

Сталь WCL (4X5MФС) переплавленная в вакууме проявляет немного более высокую стойкость к циклическим изменениям температуры чем выплавленная конвенциональным способом.

THE RESISTANCE TO CYCLIC CHANGES OF TEMPERATURE OF SOME
HOT-WORK TOOL STEELS

S u m m a r y

The influence of heat treatment conditions and external temperature of thermal cycles, as well as melting changes on the rate of resistance to cyclic changes of temperature of the selected grades of hot-work tool steels have been investigated. The Cr-Mo-V steel heat treated in optimum conditions have been found to display the greatest thermal fatigue resistance. The vacuum remelted WCL (H11) steel showed a little greater resistance to cyclic changes of temperature in comparison with conventionally melted steel.