

SYMULACJA FIZYCZNA NAGRZEWANIA IMPULSOWEGO STALI MARAGING MS350

W artykule przedstawiono wyniki analizy zmian właściwości mechanicznych i mikrostruktury stali maraging MS350 po nagrzewaniu impulsowym. Nagrzewanie impulsowe (chwilowe) do temperatury w zakresie 500÷950°C realizowano metodą oporową i indukcyjną. W wyniku nagrzewania chwilowego materiału po starzeniu standardowym można uzyskać poprawę plastyczności przy nieznacznym obniżeniu wytrzymałości materiału. Wyniki badań wskazały możliwości wytwarzania wyrobów ze stali maraging o podwyższonym poziomie plastyczności oraz wyrobów gradientowych o zmiennej mikrostrukturze i właściwościach na grubości ścianki elementu. Ustalono temperaturowy zakres stosowalności stali maraging poddanej nagrzewaniu impulsowemu.

Słowa kluczowe: stal maraging, nagrzewanie impulsowe, właściwości mechaniczne, mikrostruktura

PHYSICAL SIMULATION OF IMPULSE HEATING OF MS350 MARAGING STEEL

Results of analysis of mechanical properties and microstructure changes of MS350 maraging steel after impulse heating were presented in the article. Impulse (momentary) heating to the temperature between 500÷950°C was realised by resistance and induction methods. As a results of short-time heating of material after standard ageing, the improvement of plasticity with acceptable decrease in strength can be achieved. Examination results indicate possibilities of production of maraging steel products of higher level of plasticity and gradient products with different microstructure and properties on the cross section of the element. The temperature range for application of maraging steel subjected to impulse treatment was determined.

Keywords: maraging steel, impulse heating, mechanical properties, microstructure

1. WPROWADZENIE

Stale maraging należą do grupy stali wysokostopowych zawierających Ni, Co i Mo, umacnianych wydzieleniowo. Stale te są stosowane po starzeniu, w wyniku którego uzyskuje się wysoką twardość (do 65 HRC) przy zachowaniu wymaganego poziomu plastyczności (udarności). Najczęściej stosowane gatunki stali maraging mają skład chemiczny oparty na układzie Fe-18%Ni-Co-Mo-Ti lub/ i Al i charakteryzują się następującymi wartościami nominalnej granicy plastyczności: MS250 – 250 ksi (1725 MPa), MS300 – 300 ksi (2070 MPa) i MS350 – 350 ksi (2415 MPa). Przykładowo, standardowe parametry starzenia (temperatura w zakresie 450÷500°C oraz czas 3÷4 godziny) pozwalają na uzyskanie dla gatunku MS350 wytrzymałości na poziomie 2400 MPa, granicy plastyczności 2300 MPa przy wydłużeniu A_5 ok. 7% i udarności w temperaturze minus 40°C wynoszącej ok. 14 J/cm². Proces starzenia charakteryzują dwa podstawowe parametry: temperatura i czas, regulowanie którymi umożliwia sterowanie ułamkiem objętości i rozkładem wielkości oraz rodzajem wydzielen. Zjawiska fizyczne zachodzące w trakcie starzenia są przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych z uwagi na istotny wpływ tego stadium wytwarzania na finalne właściwości wyrobów. Kinetyka wydzielenia w stalach maraging, dla szerokiego zakre-

su parametrów obróbki cieplnej, nie została dotychczas w pełni opisana. W szczególności wczesne etapy umacniania wydzieleniowego będące przedmiotem licznych badań [1–8] nie zostały jeszcze zbadane precyzyjnie. Jeden z aspektów zagadnienia obróbki cieplnej stali maraging dotyczy mechanizmów powstawania oraz wpływu austenitu powrotnego na właściwości użytkowe stali maraging [9–17]. Warunkiem jaki spełnia skład chemiczny stali maraging w zakresie zawartości podstawowych pierwiastków stopowych jest utrzymanie trwałości fazy α (niklowego martenzytu przesyconego) w trakcie procesu starzenia bez zachodzenia przemiany odwrotnej $\alpha \rightarrow \gamma$. Powstanie austenitu podczas starzenia powoduje spadek wytrzymałości materiału. Jednocześnie stwierdzono, że austenit powrotny, w odpowiedniej ilości i postaci wpływa korzystnie na poprawę udarności stali. W związku z powyższym prowadzi się badania nad optymalizacją zawartości austenitu dla wybranych zastosowań stali maraging, gdzie wymagana jest podwyższona udarność i/lub zdolność do absorpcji energii udarowej.

Artykuł zawiera wyniki badań stali maraging, którą w stanie starzonym poddano impulsowemu nagrzewaniu. Przeprowadzono fizyczne symulacje obróbki cieplnej z zastosowaniem parametrów zbliżonych do występujących w trakcie nagrzewania indukcyjnego, w zakresie szybkości nagrzewania, czasów wygrzewa-

nia oraz szybkości i sposobu chłodzenia. Zagadnienia zawarte w artykule obejmują trzy aspekty dotyczące wytwarzania i użytkowania wyrobów ze stali maraging MS350. Pierwszy, to poprawa właściwości plastycznych (w tym udarność) kosztem jak najmniejszego spadku wytrzymałości. Drugi, to wykorzystanie efektu zmian właściwości w wyniku nagrzewania impulsowego na określonej głębokości w celu opracowania technologii wytwarzania wyrobów gradientowych (o zmiennych właściwościach na grubości elementu). Trzeci, to wyznaczenie zakresu temperatury stosowania stali maraging MS350 w warunkach chwilowego nagrzewania, a w szczególności ocena zmian właściwości mechanicznych.

2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Materiał badań stanowiły próbki cylindryczne o średnicy 6 mm i wysokości 7 mm ze stali maraging MS350. Skład chemiczny stali (analiza wytopowa) zamieszczono w tabeli 1. Materiał w stanie wyjściowym był poddany następującej obróbce cieplnej w piecu grzewczym: przesycanie w temperaturze 850°C przez 30 minut i chłodzenie zanurzeniowe w wodzie oraz starzenie w temperaturze 480°C przez 4 godziny i swobodne studzenie w powietrzu. Po zastosowaniu ww. obróbki cieplnej materiał charakteryzował się twardością 57 HRC (710-730 HV) i granicą plastyczności w teście ściskania $R_c = 2738$ MPa.

Materiał w stanie po starzeniu poddano nagrzewaniu impulsowemu oporowemu z szybkością ok. 200 K/s. Szybkość ta wynikała z technicznych możliwości urządzenia Gleeble dla zastosowanej geometrii i wymiarów próbek, które umożliwiały realizację odkształcenia po obróbce cieplnej. Po obróbce cieplnej wykonano pomiary twardości oraz badania mikrostruktury. Parametry obróbki cieplnej i odkształcenia za pomocą Gleeble były następujące: nagrzewanie impulsowe (czas wygrzewania $t_z = 0$ s) do T_z z szybkością 200 K/s; $T_z = 500^\circ\text{C}, 550^\circ, 600^\circ\text{C}, 650^\circ\text{C}, 700^\circ\text{C}, 750^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}, 850^\circ\text{C}, 900^\circ\text{C}, 950^\circ\text{C}$; chłodzenie natryskiem wodnym bezpośrednio po nagrzewaniu; wartość odkształcenia w temperaturze otoczenia po obróbce cieplnej 1,2; szybkość odkształcenia $0,01\text{ s}^{-1}$. Dla każdego wariantu obróbki cieplnej wykonano dwie próbki. Pierwszą z nich przeznaczono do eksperymentów jednoosiowego ściskania w temperaturze otoczenia, a drugą do pomiarów twardości i badań mikrostruktury. Ze względu na duże szybkości nagrzewania ok. 200 K/s i bezwładność układu kowadła-próbka, temperatura obróbki cieplnej wahała się w zakresie ok. $+30/-20^\circ\text{C}$ w stosunku do wartości założonej.

Eksperymenty obróbki cieplnej z większą szybkością nagrzewania w porównaniu do uzyskanej w symulatorze Gleeble, przeprowadzono z zastosowaniem dylatometru. Próbkę dylatometryczną w postaci rurek cienkościennych $\phi 4/\phi 3$ mm umożliwiły uzyskanie szybkości nagrzewania i chłodzenia analogicznych jak w procesie nagrzewania indukcyjnego (rzędu kilkuset K/s). Po

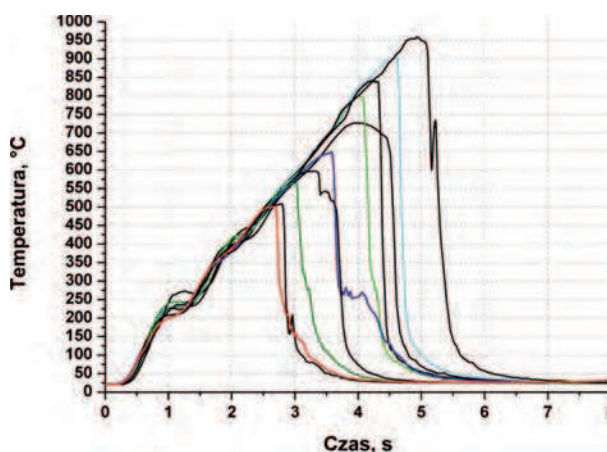
obróbce cieplnej wykonano pomiary twardości oraz badania mikrostruktury. Indukcyjne nagrzewanie impulsowe za pomocą dylatometru wykonano z szybkością ok. 500 K/s, porównywalną do wartości uzyskanych podczas nagrzewania indukcyjnego tulei o grubości ścianki do 5 mm. Rzeczywista szybkość nagrzewania indukcyjnego i chłodzenia są zależne od wielu czynników (parametrów) procesu m.in. częstotliwości i mocy generatora, czasu obróbki (prędkości przesuwu cewki), temperatury nagrzewania (początku chłodzenia), sposobu chłodzenia, itp.

Eksperymenty nagrzewania indukcyjnego w warunkach przemysłowych wykonano na odcinkach blach o wymiarach 100×200 mm i grubości 10 mm. Materiał przed nagrzewaniem indukcyjnym poddano starzeniu. Podczas testów stosowano cewki prostokątne będące na wyposażeniu urządzenia i dostępne parametry generatora. Docelowo kształt cewki oraz parametry generatora będą precyzyjnie dobrane do geometrii i wymiarów nagrzewanego elementu ze względu na jak najlepsze dopasowanie (wzbudzenie) oraz zminimalizowanie strat energii (optymalne wykorzystanie mocy generatora). W eksperymentach stosowano następujące parametry obróbki cieplnej: moc generatora 23 kW, częstotliwość 34 kHz, prędkość przesuwu cewki 30 cm/min. W trakcie prób nie było możliwości pomiarów temperatury.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. EKSPERYMENTY OPOROWEGO NAGRZEWANIA IMPULSOWEGO I ODKSZTAŁCENIA Z ZASTOSOWANIEM SYMULATORA GLEEBLE

Na rys. 1 przedstawiono zmiany temperatury na powierzchni próbek podczas obróbki cieplnej. Dla wszystkich eksperymentów wystąpiła duża zgodność w zakresie przebiegów temperatury zarówno na eta-



Rys. 1. Krzywe nagrzewania i chłodzenia próbek poddanych nagrzewaniu impulsowemu w symulatorze Gleeble
Fig. 1. Heating and cooling curves of specimens subjected to impulse heating in Gleeble simulator

Tabela 1. Skład chemiczny materiału badań-stal maraging MS350, % masowe

Table 1. Chemical composition of the examined material-MS350 maraging steel, weight %

C	Mn	Si	P	S	Ni	Co	Mo	Ti	Alc	Cu
0,007	0,05	0,02	0,010	<0,010	18,0	12,8	4,6	1,6	0,01	0,01

pie nagrzewania z szybkością 200 K/s jak i chłodzenia natryskowego. Pojedyncze rozbieżności występujące na etapie chłodzenia nie powinny mieć istotnego wpływu na właściwości materiału.

3.1.1. Wyniki badań właściwości mechanicznych w statycznej próbie ściskania

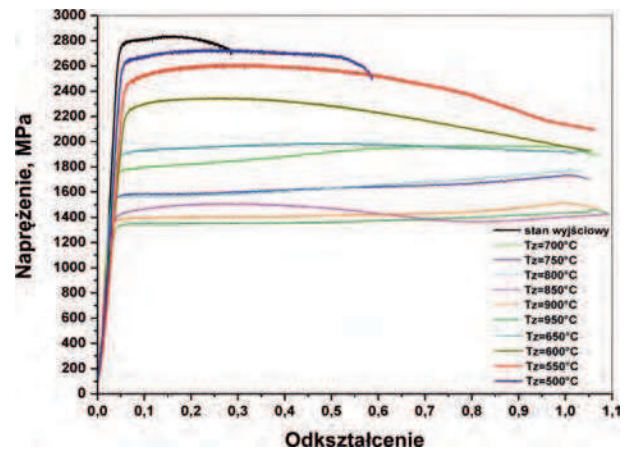
Z uwagi na wymiary stosowanych w eksperymentach próbek, właściwości mechaniczne określono metodą ściskania w temperaturze otoczenia oraz wykonano pomiary twardości HV10 i HRC. Wyznaczoną z krzywych ściskania wartość R_C oraz wyniki pomiarów twardości zamieszczono w tabeli 2. R_C odpowiada naprężeniu dla odkształcenia plastycznego wynoszącego 0,002.

Tabela 2. Wyniki pomiarów twardości oraz R_C wyznaczonej z krzywych ściskania dla próbek poddanych impulsowemu nagrzewaniu w urządzeniu Gleeble

Table 2. Results of hardness measurements and R_C determination based on compression curves for specimens subjected to impulse heating in Gleeble device

Temperatura nagrzewania impulsowego, °C	Twardość HV10	Twardość HRC	R_C MPa
stan wyjściowy 480°C – 4 h	710	57	2738
495	-	-	2590
501	728	55	-
549	-	-	2413
565	690	56	-
594	-	-	2203
597	666	54	-
670	-	-	1843
648	634	52	-
706	-	-	1717
716	438	41	-
779	-	-	1510
727	432	41	-
806	-	-	1502
798	415	38	-
842	-	-	1367
842	405	39	-
904	-	-	1340
903	380	34	-
952	-	-	1312
957	365	33	-

Na rys. 2 przedstawiono zestawienie krzywych ściskania stali maraging MS350 po starzeniu (stan wyjściowy) oraz po oporowym nagrzewaniu impulsowym. Stal po starzeniu standardowym, stanowiła materiał odniesienia i charakteryzowała się najwyższą wartością R_C i najniższymi właściwościami plastycznymi. Właściwości plastyczne określano z krzywych ściskania jako wartość uzyskanego w eksperymencie odkształcenia całkowitego, aż do ewentualnego pęknięcia próbki uniemożliwiającego dalsze ściskanie. Ze wzrostem temperatury nagrzewania impulsowego obserwowano spadek właściwości wytrzymałościowych przy jednoczesnym wzroście właściwości plastycznych. Na szczególną uwagę zasługują warianty obróbki cieplnej, po zastosowaniu których, stwierdzono znaczny wzrost plastyczności stali przy zachowaniu wysokich właściwości wytrzymałościowych. Dla temperatur nagrzewania 500°C, 550°C i 600°C wartość R_C pozostawała na

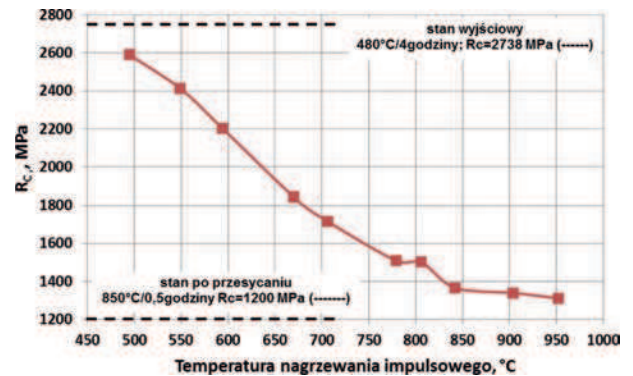


Rys. 2. Krzywe ściskania stali MS350 po impulsowym nagrzewaniu w symulatorze Gleeble w zakresie temperatur 500÷950°C oraz w stanie wyjściowym (starzenie w 480°C przez 4 godziny)

Fig. 2. Compression curves of MS350 maraging steel after impulse heating in Gleeble simulator at temperatures between 500÷950°C and in the initial state (ageing at 480°C for 4 hours)

wysokim poziomie powyżej 2000 MPa, a wartość odkształcenia w odniesieniu do stanu wyjściowego wzrosła kilkukrotnie. Próbkę nagrzewaną do temperatury powyżej 900°C wykazywały poziom R_C zbliżony do materiału po przesycaniu.

Na rys. 3 zamieszczono zmiany R_C w funkcji temperatury nagrzewania impulsowego. Zastosowane impulsowe nagrzewanie spowodowało monotoniczny spadek R_C ze wzrostem temperatury obróbki cieplnej.

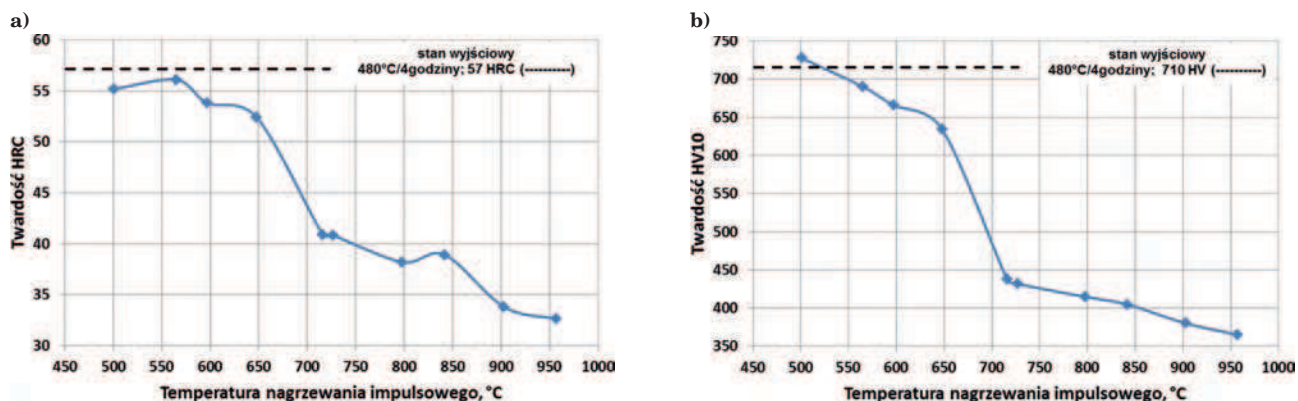


Rys. 3. Zmiany R_C stali maraging MS350 starzonej w 480°C przez 4 godziny i następnie nagrzewanej impulsowo do temperatury w zakresie 500÷950°C

Fig. 3. R_C changes of MS350 maraging steel aged at 480°C for 4 hours and then impulse heated to temperatures between 500÷950°C

3.1.2. Wyniki pomiarów twardości

Po nagrzewaniu impulsowym w symulatorze Gleeble wykonano pomiary twardości materiału metodami HV oraz HRC. Wyniki pomiarów twardości przedstawiono na rys. 4. Z diagramów wynika, że przy szybkości nagrzewania 200 K/s, wyraźny spadek twardości występuje po przekroczeniu temperatury 650°C. Próbkę nagrzewaną do temperatury w zakresie 500÷600°C charakteryzowały się twardością 54÷56 HRC (660÷700 HV). Nagrzewanie do 700°C skutkuje spadkiem twardości do ok. 40 HRC (450 HV). Dla temperatury nagrzewania powyżej 700°C występuje monotoniczny spadek twardości od ok. 40 HRC (450 HV) do 33 HRC (360



Rys. 4. Zmiany twardości HRC (a) i HV (b) stali MS350 starzonej w 480°C przez 4 godziny i następnie nagrzewanej impulsowo do temperatury w zakresie 500÷950°C

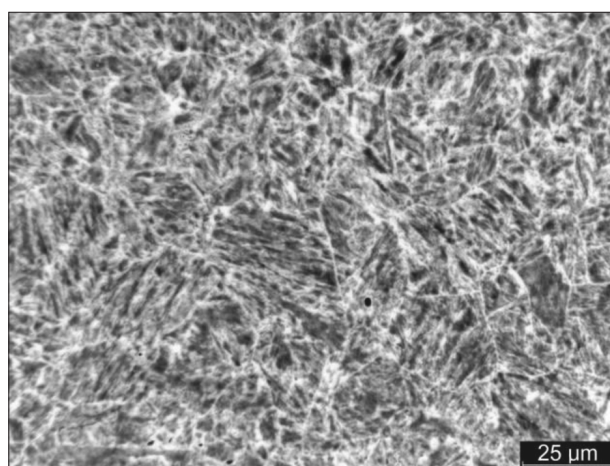
Fig. 4. Changes of HRC (a) and HV (b) hardness of MS350 maraging steel aged at 480°C for 4 hours and then impulse heated to temperatures between 500÷950°C

HV). Próbki nagrzewane impulsowo do temperatury powyżej 900°C charakteryzują się twardością zbliżoną do materiału po przesycaaniu standardowo stosowanym dla tego gatunku stali – 850°C/30 minut/chłodzenie wodne.

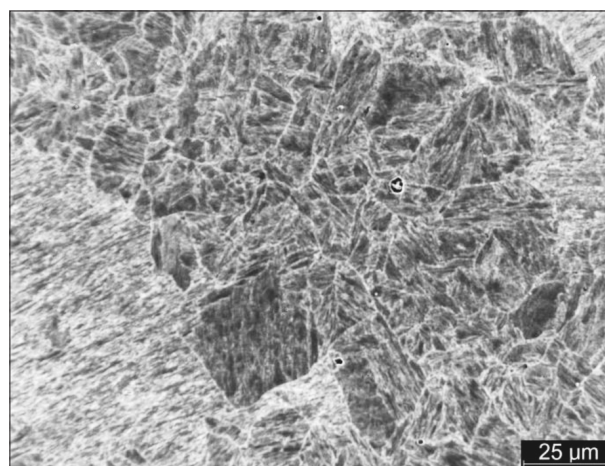
3.1.3. Wyniki badań mikrostruktury

W pobliżu miejsc pomiarów twardości wykonano badania mikrostruktury z zastosowaniem mikroskopu

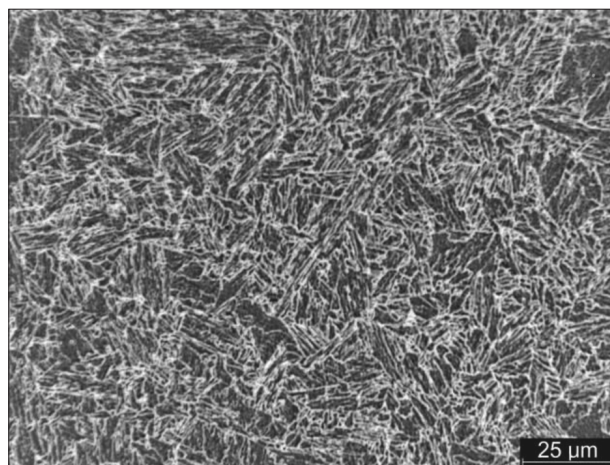
światłowego w zakresie powiększeń do 800×. Reprezentatywne mikrostruktury po zastosowaniu nagrzewania impulsowego w zakresie temperatury 500÷950°C zamieszczono na rys. 5. Mikrostruktura po nagrzewaniu do temperatury poniżej 600°C jest zbliżona do stanu początkowego materiału (po starzeniu standardowym). Pierwsze widoczne w mikroskopie świetlnym zmiany mikrostruktury obserwowano po nagrzewaniu do 650°C. Mikrostruktura składała się z dwóch faz, z któ-



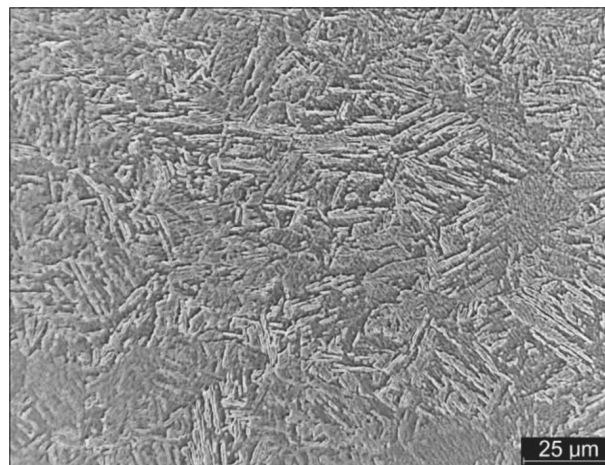
(a) 500°C, 728 HV



(b) 650°C, 634 HV



(c) 800°C, 415 HV



(d) 950°C, 365 HV

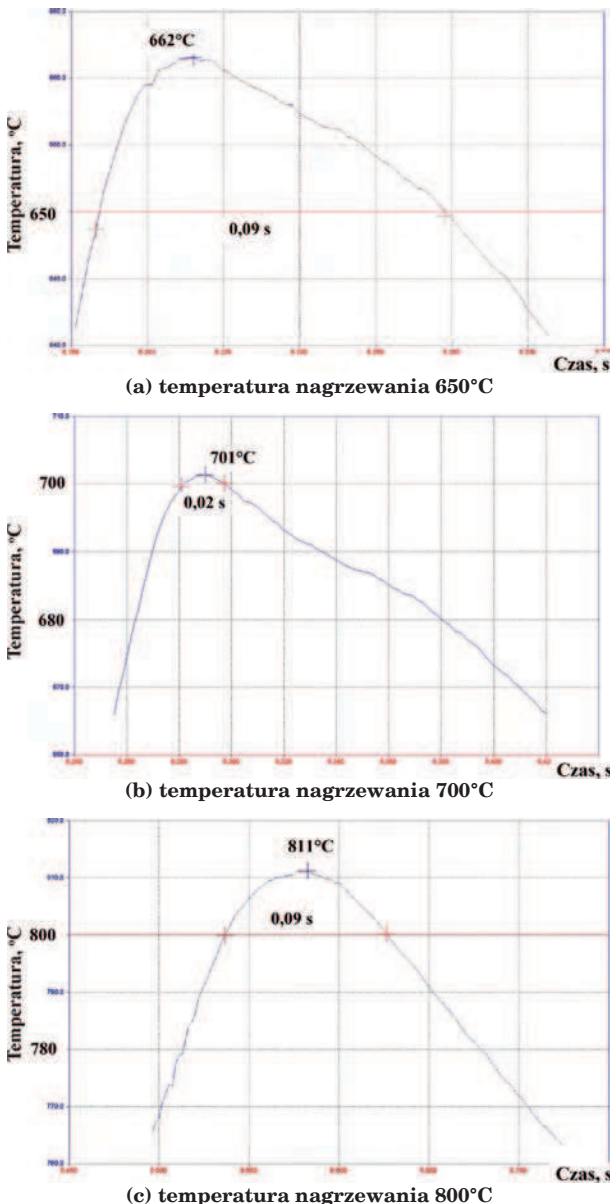
Rys. 5. Mikrostruktura stali maraging MS350 po impulsowym nagrzewaniu w zakresie temperatur 500÷950°C

Fig. 5. Microstructure of MS350 maraging steel after impulse heating at temperatures between 500÷950°C

rych jedną stanowiła faza początkowa (martenzyt starzony), a drugą martenzyt przesycony. Należy zaznaczyć, że specyficzne warunki przesycań (krótki czas i niska temperatura) znacznie odbiegają od standardowo stosowanych dla tego gatunku stali. Mikrostruktura dla temperatury wygrzewania powyżej 600°C może także zawierać austenit powrotny. Ze wzrostem temperatury nagrzewania wzrastał udział fazy martenzytu przesyconego powstałego z austenitu. Mikrostruktura po wygrzewaniu impulsowym w temperaturze 950°C była analogiczna jak dla materiału przesycań w warunkach standardowych.

3.2. EKSPERYMENTY INDUKCYJNEGO NAGRZEWANIA IMPULSOWEGO Z ZASTOSOWANIEM DYLATOMETRU

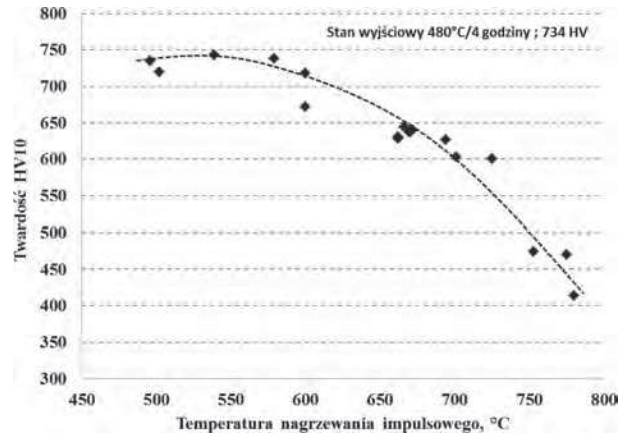
Dla każdej temperatury nagrzewania impulsowego w zakresie 500÷800°C wykonano dwa eksperymenty. Na rys. 6 zamieszczono przykładowe fragmenty krzy-



Rys. 6. Przykładowe krzywe nagrzewania indukcyjnego w pobliżu temperatury obróbki cieplnej

Fig. 6. Examples of induction heating curves at the vicinity of heat treatment temperature

wych nagrzewania i chłodzenia w pobliżu temperatury obróbki cieplnej. Z krzywych wynika, że zgodnie z założeniem, uzyskano bardzo krótki czas obróbki cieplnej (poniżej 0,1 s) w pobliżu temperatury nagrzewania. Wyniki pomiarów twardości po obróbce cieplnej przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Zmiany twardości stali maraging MS350 po nagrzewaniu impulsowym do temperatury w zakresie 500÷800°C w dylatometrze

Fig. 7. Hardness changes of MS350 maraging steel after impulse heating at temperatures between 500÷800°C using dilatometer

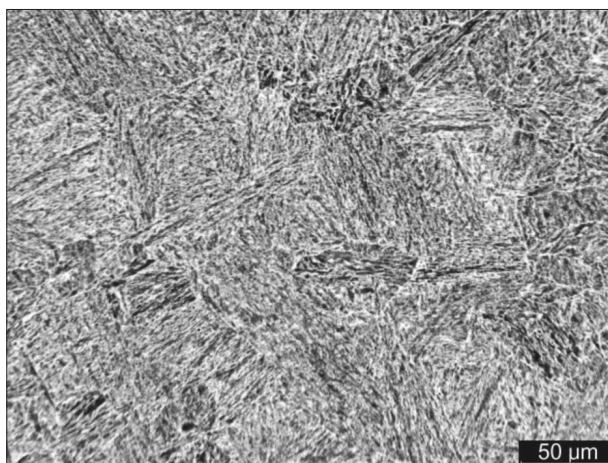
Impulsove nagrzewanie stali maraging o twardości początkowej ok. 735 HV w zakresie temperatury od 500 do 700°C powoduje nieznaczny spadek twardości. Materiał po nagrzewaniu do temperatury w zakresie 500÷600°C charakteryzował się twardością zbliżoną do początkowej. Dla temperatury nagrzewania w zakresie 650÷700°C twardość wynosiła odpowiednio ok. 650÷600 HV. Wyraźny spadek twardości do wartości poniżej 500 HV wystąpił dla temperatur nagrzewania powyżej 750°C. Minimalną twardością ok. 400 HV charakteryzowała się próbka nagrzewana impulsowo do temperatury 800°C.

3.2.1. Mikrostruktura po nagrzewaniu impulsowym za pomocą dylatometru

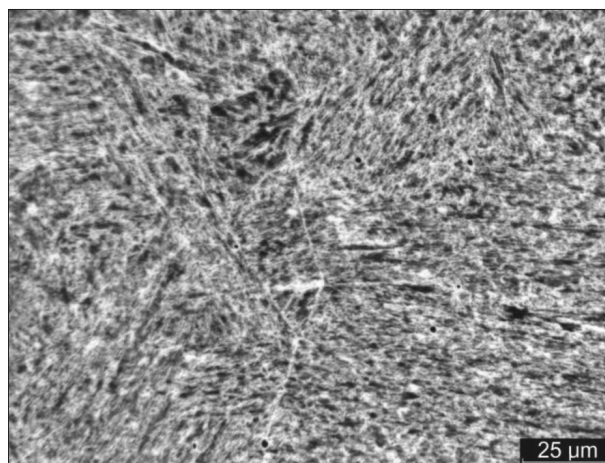
Badania mikrostruktury wykonano za pomocą mikroskopu świetlnego w zakresie powiększeń do 800×. Na rys. 8 zamieszczono przykłady mikrostruktury stali MS350 po starzeniu w temperaturze 480°C przez 4 godziny składającej się z martenzytu i słabo uwidoczniionych w wyniku trawienia byłych granic ziarn austenitu. Po impulsowym nagrzewaniu w temperaturze poniżej 720°C próbek uprzednio starzonych, zmiany mikrostruktury dotyczą jedynie pojawienia się wyraźnych granic ziarn byłego austenitu (Rys. 9a). Dla temperatury nagrzewania powyżej 750°C mikrostruktura składa się wyłącznie z martenzytu przesyconego i jest zbliżona do materiału po przesycań w standardowych warunkach obróbki cieplnej dla tego gatunku stali, tj. 850°C/30 minut/chłodzenie wodne (Rys. 9b).

3.3. WYNIKI BADAŃ PO EKSPERYMENTACH NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

Wyniki pomiarów twardości odcinka blachy o grubości 10 mm poddanego nagrzewaniu indukcyjnemu w testach przemysłowych zamieszczono na rys. 10. Po zastosowaniu strefowego nagrzewania indukcyjnego



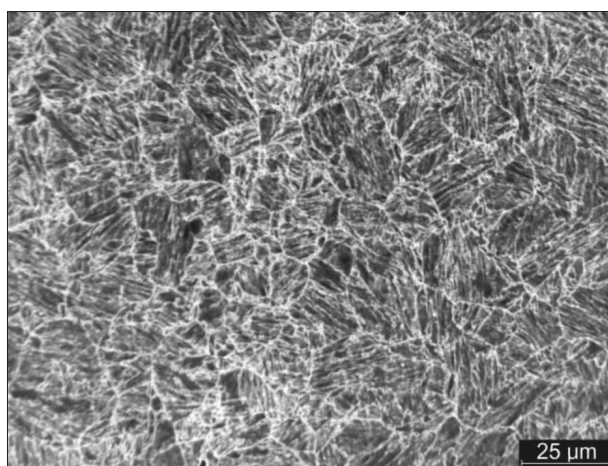
(a) pow. 200×



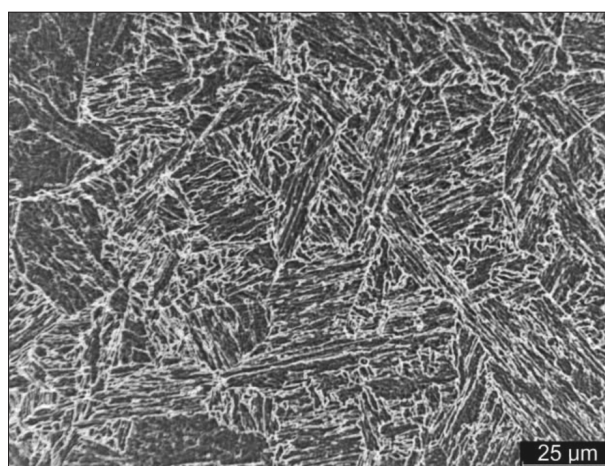
(b) pow. 400×

Rys. 8. Mikrostruktura stali MS350 przesyconej w temperaturze 850°C przez 30 minut oraz starzonej w temperaturze 480°C przez 4 godziny (twardość 57 HRC – 734 HV)

Fig. 8. Microstructure of MS350 maraging steel after solution heat treatment at 850°C for 30 minutes and aged at 480°C for 4 hours (hardness of 57 HRC – 734 HV)



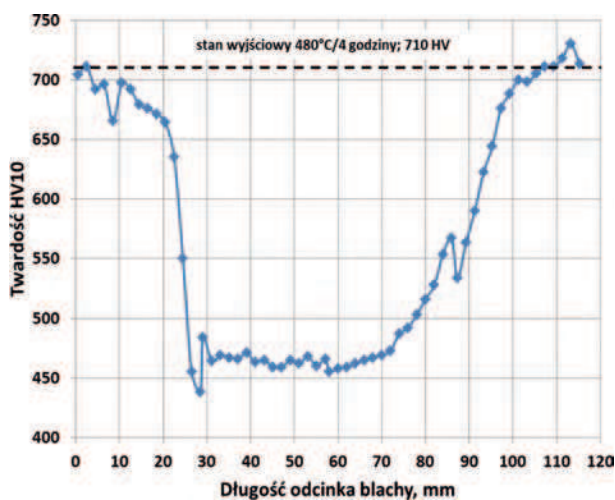
(a) 700°C (725°C) 601 HV



(b) 800°C (780°C) 414 HV

Rys. 9. Mikrostruktura stali MS350 po starzeniu oraz impulsowym nagrzewaniu indukcyjnym. W nawiasach rzeczywista temperatura zarejestrowana podczas eksperymentu

Fig. 9. Microstructure of MS350 maraging steel after ageing and impulse heating. In the brackets, the actual temperature recorded during the experiment



Rys. 10. Wyniki pomiarów twardości blachy ze stali maraging MS350 po nagrzewaniu indukcyjnym

Fig. 10. Results of hardness measurements of sheet made of MS350 maraging steel after induction heating

materiału starzonego o twardości 710 HV, twardość spadała do poziomu ok. 450÷470 HV. Występowała strefa przejściowa o twardości od 450 do 710 HV i szerokości ok. 30 mm.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania właściwości i mikrostruktury stali maraging MS350, którą w stanie po starzeniu standardowym poddano impulsowemu nagrzewaniu. Nagrzewanie impulsowe w zakresie temperatury 500÷950°C realizowano metodami: oporową z szybkością ok. 200 K/s i indukcyjną z szybkością ok. 500 K/s. Wykonano badania materiału poddanego strefowemu nagrzewaniu indukcyjnemu w warunkach przemysłowych.

Na podstawie eksperymentów impulsowego nagrzewania oporowego stali MS350 z szybkością ok. 200 K/s za pomocą symulatora Gleeble stwierdzono:

- poprawę plastyczności stali MS350 przy nieznacznym spadku wytrzymałości po nagrzewaniu do temperatury w zakresie 500÷600°C; właściwości wytrzymałościowe stali po nagrzewaniu do temperatury 900°C i 950°C są bliskie stanowi przesyconemu w warunkach standardowo stosowanych dla tego gatunku,
 - nieznaczny spadek twardości stali MS350 z ok. 57 HRC (710 HV) do ok. 56÷55 HRC (710÷660 HV) dla temperatur nagrzewania 500÷600°C; impulsowe nagrzewanie do temperatur 900°C i 950°C spowodowało spadek twardości stali do poziomu zbliżonego do stanu przesyconego w warunkach standardowo stosowanych dla tego gatunku,
 - widoczne w mikroskopie świetlnym zmiany mikrostruktury objawiające się występowaniem dwóch faz po nagrzewaniu do temperatur wyższych od 650°C; nagrzewanie do 900°C skutkuje powstaniem mikrostruktury analogicznej jak dla stanu przesyconego w całej objętości próbki.
- Na podstawie eksperymentów impulsowego nagrzewania indukcyjnego z szybkością ok. 500 K/s za pomocą dylatometru stwierdzono:
- spadek twardości z początkowej ok. 735 HV do ok. 400 HV dla temperatury nagrzewania w zakresie 500÷800°C,
 - wysoki poziom twardości powyżej 700 HV po nagrzewaniu impulsowym w zakresie temperatury 500-600°C,

- zmiany mikrostruktury dotyczące wyraźnych granic ziarn byłego austenitu, które pojawiły się po nagrzewaniu do temperatur w zakresie 670÷720°C; po nagrzewaniu powyżej 750°C stwierdzono występowanie mikrostruktury charakterystycznej dla materiału przesyconego.

Ze wzrostem szybkości nagrzewania z ok. 200 do 500 K/s wzrasta temperatura, powyżej której następuje znaczący spadek twardości starzonej stali MS350 (poniżej 500 HV). Dla nagrzewania oporowego z szybkością 200 K/s temperatura ta wynosi 650°C, a dla nagrzewania indukcyjnego z szybkością 500 K/s – ok. 720°C.

Wyniki badań impulsowego nagrzewania i intensywnego chłodzenia stali MS350 po starzeniu zostaną wykorzystane w projektowaniu technologii powierzchniowej obróbki cieplnej wyrobów z tej stali, m.in. w celu wytworzenia gradientu właściwości na przekroju poprzecznym lub w celu poprawy właściwości plastycznych stali maraging starzonych na twardość maksymalną, przy zachowaniu wymaganych właściwości wytrzymałościowych.

Artykuł zawiera wyniki badań uzyskane w pracy S0-0796 finansowanej z dotacji na działalność statutową w roku 2011.

LITERATURA

1. Floreen S.: Hardening behavior of ternary alloys based on iron-18% nickel. Transactions of the ASM, 1964, 57, s. 38–47
2. Speich G.R.: Age-hardening of Fe-20 pct Ni martensites. Transactions of the metallurgical society of AIME, 1963, 227, s. 1426–1432
3. Magnee A., Viatour P., Drapier J.M., Coutsouradis D., Habraken L.: Microstructure, strength and toughness of 13Ni(400) maraging steel. Cobalt (1), 1973, s. 3–10
4. Baker A.J., Swann P.R.: The hardening mechanism in maraging steels. Transactions of the ASM, 1964, 57, s. 1008-1011
5. Shozo Saito, Paul A. Beck: The crystal structure of MoNi₃. Transactions of the metallurgical society of AIME, 1959, 215, s. 938–941
6. Ko Soeno and Tetsuro Kuroda: Resistometric study of precipitation in maraging steels. Transactions ISIJ, 1970, 10, s. 369–378
7. Peters D.T.: Precipitate reversion in 18 pct Ni-Co-Mo steels. Transactions of the metallurgical society of AIME, 1967, 239, s. 1981–1988
8. Marcisz J.: Optymalizacja obróbki cieplnej stali maraging. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2015
9. Vylezhnev V.P., Kokovyakina S.A., Simonov Yu.N., Sukhikh A.A.: Maraging and nickel-molybdenum trip-steels; Elevation of reliability characteristics of maraging steel 03N18K9M5T by creating a "nanotriplex"-type structure. Metal Science and Heat Treatment, 2011, 52, s. 550–557
10. Viswanathan U.K., Dey G.K., Asundi M.K.: Precipitation hardening in 350 grade maraging steel. Metallurgical Transactions A, 1993, 24A, s. 2429–2442
11. Shekhter A., Aaronson H.I., Miller M.K., Ringer S.P., Pereloma E.V.: Effect of Aging and Deformation on the Microstructure and Properties of Fe-Ni-Ti Maraging Steel. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35A, s. 973–983
12. Yi He, Ke Yang and Wei Sha: Microstructure and mechanical properties of a 2000 MPa grade Co-free maraging steel. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36A, s. 2273–2287
13. Tewari R., Mazumder S., Batra I.S., Dey G.K., Banerjee S.: Precipitation in 18 wt. % Ni maraging steel of grade 350. Acta Materialia, 2000, 48, s. 1187–1200
14. Guo Z., Sha W., Li D.: Quantification of phase transformation kinetics of 18 wt. % Ni C250 maraging steel. Materials Science and Engineering A, 2004, 373, s. 10–20
15. Pardal J.M., Tavares S.S.M., Terra V.F., Da Silva M.R., Dos Santos D.R.: Modeling of precipitation hardening during the aging and overaging of 18Ni-Co-Mo-Ti maraging 300 steel. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 393, s. 109–113
16. Sha W.: Quantification of age hardening in maraging steels and an Ni-base superalloy, Scripta mater 2000, 42, s. 549–553
17. Xiang Li, Zhongda Yin: Mossbauer study of the aging behaviour of 18Ni(350) maraging steel. Materials Letters, 1995, 24, s. 235–238