

Jarosław MARCISZ, Wojciech BURIAN, Mariusz ADAMCZYK

Instytut Metalurgii Żelaza

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE STALI MARAGING MS300 PO STARZENIU KRÓTKOTRWAŁYM

Przeprowadzono eksperymenty starzenia krótkotrwałego stali maraging MS300 z zastosowaniem nagrzewania oporowego w symulatorze Gleeble, nagrzewania w złożu fluidalnym oraz w komorowych piecach grzewczych. Wyznaczono parametry obróbki cieplnej starzenia krótkotrwałego, w wyniku której uzyskuje się wymaganą kombinację wytrzymałości i plastyczności. W odniesieniu do właściwości po starzeniu standardowym uzyskano nieznacznie niższą wytrzymałość, ale wysoką plastyczność i udarność stali. W wyniku starzenia w zakresie temperatury 540÷560°C w czasie od 5 do 15 minut stal maraging MS300 osiągnęła następujące właściwości mechaniczne: $R_{0,2}$ 1700÷1800 MPa; R_m 1800÷1900 MPa, wydłużenie A 10%, udarność w temperaturze -40°C 28÷37 J oraz twardość 550÷600 HV.

Słowa kluczowe: stal maraging, starzenie krótkotrwałe, właściwości mechaniczne, udarność

MECHANICAL PROPERTIES OF MS300 MARAGING STEEL AFTER SHORT-TIME AGEING

Short-time ageing experiments of MS300 maraging steel using resistance heating in Gleeble simulator, fluidized bed and chamber furnaces were carried out. Short-time ageing heat treatment parameters to obtain required combination of strength and toughness were determined. In comparison with mechanical properties of MS300 maraging steel after standard ageing slightly lower strength but higher plasticity and toughness of the steel were observed. As a result of ageing in the temperature range of 540÷560°C for 5 to 15 minutes the mechanical properties of MS300 maraging steel were as follows: $R_{0,2}$ 1700÷1800 MPa; R_m 1800÷1900 MPa, elongation A 10%, notched impact strength at -40°C 28÷37 J and hardness 550÷600 HV.

Keywords: maraging steel, short-time ageing, mechanical properties, impact strength

1. WSTĘP

Standardowe starzenie wysokowytrzymałej stali maraging MS300 umacniającej wydzieleniowo wykonywane jest z zastosowaniem temperatury w zakresie 470÷500°C oraz czasu 3÷4 godziny. Stal maraging MS300 po starzeniu standardowym uzyskuje wytrzymałość na poziomie 2100 MPa, granicę plastyczności 1900 MPa przy wydłużeniu A ok. 7% i udarność w temperaturze -40°C wynoszącą ok. 10 J. Wyniki badania dynamiki procesów wydzielenia w stalach umacnianych dyspersyjnie wskazują, że osiągnięcie wysokiej wytrzymałości i jednocześnie dobrej ciągliwości w krótkim czasie jest możliwe przy zastosowaniu podwyższonej temperatury obróbki cieplnej. Zgodnie z teorią zarodkowania i wzrostu wydzielen, w podwyższonej temperaturze starzenia powstaje duża liczba zarodków, a krótki czas procesu zapobiega ich wzrostowi. Zastosowanie takich parametrów starzenia dla stali maraging przyczynia się do powstania dużej liczby wydzielen o rozkładzie wielkości i ułamku objętości optymalnym z punktu widzenia uzyskania wysokiej wytrzymałości i jednocześnie zachowania wysokiej plastyczności, w wyniku homogenicznego umocnienia osnowy nanocząstkami i/lub nanoobszarami segregacyjnymi (przedwydzieleniowymi), które nie blokują w istotny sposób dyslokacji istniejących w osnowie.

Proces starzenia jest przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych z uwagi na istotny wpływ tego etapu wytwarzania na finalne właściwości wyrobów. Kinetyka wydzielenia dla różnych gatunków stali maraging obejmuje szeroki zakres parametrów obróbki cieplnej i nie została dotychczas w pełni opisana. W szczególności wczesne etapy umacniania wydzieleniowego będące przedmiotem licznych badań [1–7] nie zostały jak dotąd precyzyjnie zbadane. W związku z powyższym zastosowanie zmodyfikowanych parametrów obróbki cieplnej dla tych stali wymaga potwierdzenia stabilności procesu wytwarzania i właściwości.

W pracy wykonano badania stali maraging MS300 poddanej krótkotrwałej obróbce cieplnej z zastosowaniem złoża fluidalnego, komorowych pieców grzewczych oraz nagrzewania oporowego. Celem badań było wyznaczenie zmodyfikowanych parametrów starzenia tego gatunku stali w odniesieniu do parametrów standardowych, które zapewnią wymagany poziom wytrzymałości oraz wyższe właściwości plastyczne, w tym udarność.

2. MATERIAŁ BADAŃ

Materiał badań stanowiły odcinki blach ze stali maraging MS300 wykonane z wlewków laboratoryjnych.

Tablica 1. Skład chemiczny materiału badań (stal maraging MS300), % masowe

Table 1. Chemical composition of examined material (MS300 maraging steel), weight %

C	Mn	Si	P	S	Ni	Co	Mo	Ti	Al _{met}
0,015	0,12	<0,05	0,010	0,010	17,8	9,4	4,5	0,74	0,11
<0,008	<0,05	<0,05	<0,01	<0,010	17,9	9,3	5,0	0,70	0,13

Wlewki o masie ok. 80 kg wytopiono i odlano w piecu próżniowym VSG100S. Z wlewków metodą walcowania na gorąco wytworzono blachy o szerokości 170÷250 mm i grubości w zakresie 4÷12 mm. Składy chemiczne materiału badań (analiza wytopowa) zawiera tablica 1. Z blach tych wykonano próbki do badań z zastosowaniem nagrzewania oporowego w symulatorze Gleeble (próbki walcowe), do obróbki cieplnej fluidalnej (odcinki blach) i do obróbki cieplnej w piecach grzewczych (próbki wytrzymałościowe płaskie i udarnościowe).

3. ZAKRES I METODY BADAŃ

3.1 EKSPERYMENTY Z ZASTOSOWANIEM SYMULATORA GLEELE 3800

Parametry eksperymentów wykonanych za pomocą symulatora Gleeble obejmowały proces obróbki cieplnej oraz odkształcenia na zimno metodą jednoosiowego ściskania. Wykonano starzenie krótkotrwałe z zastosowaniem czasów: 2, 3, 5 i 10 minut w temperaturach: 520, 540, 550, 560 i 570°C. Szybkość nagrzewania oporowego próbek walcowych o średnicy 6 mm i wysokości 7 mm wynosiła 10°C/s. Jako materiał odniesienia, przygotowano próbki starzone przez 1, 2, 3 i 4 godziny w temperaturach 480, 490 i 500°C. Testy ściskania przeprowadzono dla próbek po starzeniu krótkotrwałym oraz dla próbek starzonych z zastosowaniem parametrów standardowych. Szybkość odkształcenia wynosiła 0,01 s⁻¹, a założona wartość odkształcenia 1,2. Z krzywych ściskania wyznaczono granicę plastyczności (R_C) odpowiadającą naprężeniu przy wartości odkształcenia 0,002.

Celem badań było określenie zakresu temperatury i czasu krótkotrwałego starzenia zapewniających uzyskanie jednocześnie wysokich właściwości wytrzymałościowych i plastycznych materiału. Na podstawie wyników eksperymentów w Gleeble, wyznaczono zakres parametrów starzenia w złożu fluidalnym i w komorowych piecach grzewczych. Uzyskane wyniki badań stali po starzeniu krótkotrwałym (twardość, granica plastyczności w próbie ściskania R_C i plastyczność oceniana na podstawie zachowania się próbek w trakcie testów) odniesiono do materiału po starzeniu w warunkach standardowych.

3.2 OBRÓBKA CIEPLNA W ZŁOŻU FLUIDALNYM

Obróbka cieplna w złożach fluidalnych (obróbka cieplna fluidalna) jest jedną z odmian technologii atmosferycznej obróbki cieplnej. Złożem fluidalnym jest materiał ziarnisty, przedmuchiwany od dołu ku górze gazem o określonej prędkości i wydajności, przy których złożo przechodzi w stan półzawieszony czyli fluidalny [8, 9]. Materiałem rozpowszechnionym w obróbce cieplnej fluidalnej stanowiącym złożo jest elektrokorund

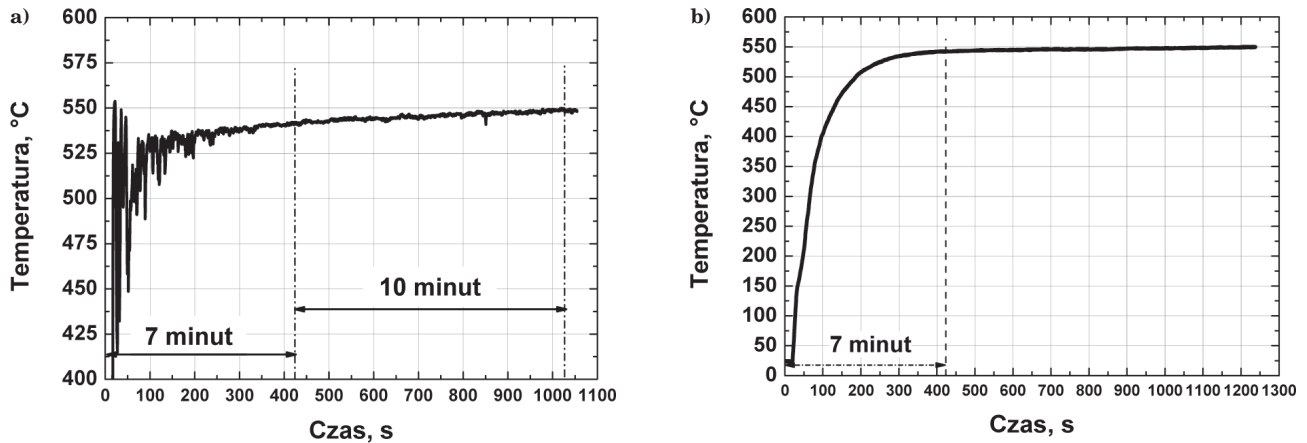
o ziarnistości 75÷300 μm. Czas do nagrzania elementu w złożu fluidalnym jest porównywalny do czasu nagrzewania w kąpeli solnej. Atutem złoża jest możliwość ścisłej kontroli procesu nagrzewania i chłodzenia oraz jednorodny rozkład temperatury w objętości warstwy fluidalnej. Proces wymiany ciepła w czasie nagrzewania w złożu fluidalnym odbywa się przy współczynniku przenoszenia ciepła wynoszącym 450÷850 W/m²K (dla porównania współczynnik ten dla nagrzewania w kąpeli solnej wynosi 550÷1100 W/m²K) [10]. W porównaniu z tradycyjnymi piecami komorowymi atmosferycznymi (współczynnik wymiany ciepła w zakresie 20÷50 W/m²K) szybkość wymiany ciepła dla złoża jest zdecydowanie większa. Eksperymenty wykonano w Zakładzie Obróbki Ciepłej Instytutu Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie.

Celem obróbki cieplnej fluidalnej było przeprowadzenie testów krótkotrwałego starzenia. Wymiary zastosowanych próbek umożliwiły wykonanie z nich standardowych próbek wytrzymałościowych płaskich. Zrealizowano obróbkę cieplną 10 odcinków blach ze stali maraging MS300 o wymiarach 100×240 mm o grubości 4,3 mm (5 sztuk) i o grubości 6,6 mm (5 sztuk). Zaplanowano starzenie w temperaturze 550 (±) 3°C z zastosowaniem następujących czasów wygrzewania po osiągnięciu temperatury docelowej: 2, 3, 5 i 10 minut. Wykonano także eksperymenty wyłącznie nagrzewania, bez wygrzewania. Dodatkowo przeprowadzono nagrzewanie z rejestracją temperatury próbki testowej o wymiarach 6,4×100×240 mm z termoparą płaszczową o średnicy 1 mm umieszczoną w środku grubości blachy. Obróbkę cieplną przeprowadzono w piecu FPW 700-1 (fluidalny piec wannowy) o maksymalnej temperaturze złoża 700°C. Wymiary wanny (złoża) wynosiły φ200 × 750 mm, a przepływ powietrza 950 l/h. Materiał złoża stanowił SiC o wielkości ziarna 100 μm.

Na podstawie pomiarów temperatury dla próbki testowej z termoparą, wyznaczono czas nagrzewania dla zastosowanych wymiarów próbek i parametrów procesu wynoszący 7 minut (rys. 1). Stosowano podwyższoną w odniesieniu do założonej temperaturę złoża wynoszącą 557°C, co skutkowało osiągnięciem temperatury próbki ok. 550°C. W tablicy 2 przedstawiono zakres i parametry zrealizowanej obróbki cieplnej fluidalnej.

3.3 OBRÓBKA CIEPLNA W PIECACH KOMOROWYCH

W piecach komorowych wykonano obróbkę cieplną próbek wytrzymałościowych i udarnościowych ze stali maraging MS300. Zastosowano nagrzewanie próbek w piecu o temperaturze wyższej od docelowej o ok. 50÷70°C, a następnie po osiągnięciu tej temperatury wygrzewano je w drugim piecu w temperaturze starzenia. Obróbkę cieplną wykonano zgodnie z założeniami zgłoszenia patentowego IMŻ [11]. Zgłoszenie dotyczy krótkotrwałego starzenia w temperaturze wyższej od temperatury starzenia standardowego, z wymuszonym szybkim nagrzewaniem do temperatury obróbki



Rys. 1. Zmiany temperatury złoża fluidalnego (a) oraz temperatury próbki testowej (b) w trakcie obróbki cieplnej stali maraging MS300

Fig. 1. Fluidized bed temperature changes (a) and temperature of test sample during heat treatment of MS300 maraging steel

Tablica 2. Oznaczenie próbek i parametry obróbki cieplnej fluidalnej

Table 2. Specimens denotation and parameters of fluidized bed heat treatment

Grubość próbki, mm / Oznaczenie próbki	Czas starzenia w temperaturze 550°C, minuty	Całkowity, rzeczywisty czas obróbki cieplnej / Zakres temperatury złoża w trakcie obróbki cieplnej
4,3 / 1	10	17 minut / 541÷549°C
6,6 / 1		
4,3 / 2	5	12 minut / 553÷538°C
6,6 / 2		
4,3 / 3	3	10 minut / 538÷543°C
6,6 / 3		
4,3 / 4	2	9 minut / 552÷546°C
6,6 / 4		
4,3 / 5	„0”	7 minut / 554-542°C
6,6 / 5		

i z szybkim chłodzeniem po krótkim regulowanym wytrzymaniu w temperaturze starzenia. W eksperymentach stosowano temperaturę starzenia 550°C i czas obróbki od 0 do 15 minut, podobnie jak dla obróbki cieplnej fluidalnej.

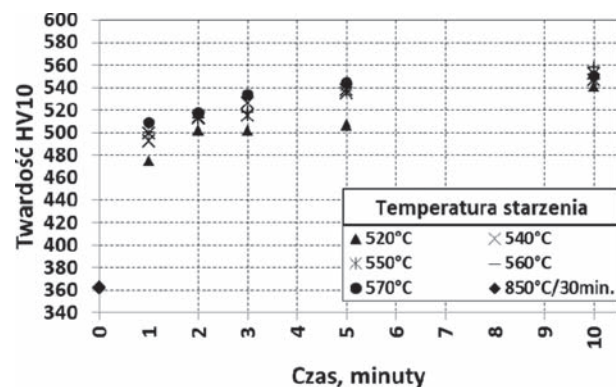
4. WYNIKI BADAŃ

4.1 WYNIKI BADAŃ MATERIAŁU PO OBRÓBCE CIEPLNEJ I ODKSZTAŁCENIU W SYMULATORZE GLEEBLE 3800

Eksperymenty obróbki cieplnej z zastosowaniem symulatora Gleeble wykonano w celu wytworzenia materiału do prób ściskania i wyznaczenia wartości granicy plastyczności dla szerokiego zakresu parametrów starzenia krótkotrwałego. Wyznaczono przedziały temperatury i czasu, dla których można uzyskać wymagany poziom wytrzymałości.

Wyniki pomiarów twardości

Wyniki pomiarów twardości próbek po obróbce cieplnej w Gleeble zamieszczone na rys. 2 wskazują na monotoniczny wzrost twardości ze wzrostem zarówno czasu jak i temperatury starzenia w zakresie od 470 do 560 HV. Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że optymalny zakres starzenia krótkotrwałego dla stali MS300 to temperatura 540÷570°C i czas 3÷10



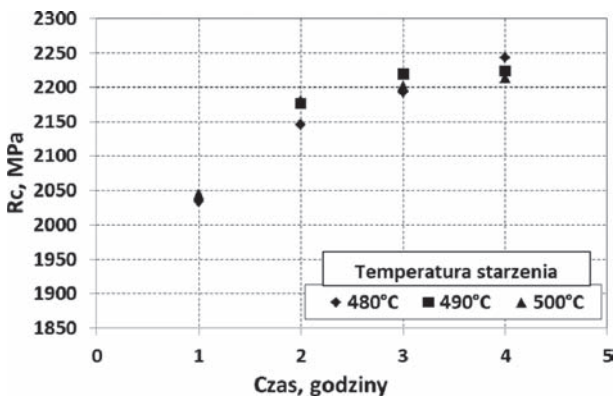
Rys. 2. Wyniki pomiarów twardości HV10 próbek starzonych z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800

Fig. 2. Results of hardness measurements of specimens aged with the use of Gleeble 3800 simulator

minut. Po zastosowaniu tych parametrów uzyskuje się twardość w zakresie 520÷560 HV.

Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych

Z krzywych ściskania dla materiału po przesycaniu określono wartość R_C wynoszącą ok. 1080 MPa. Diagram zbiorczy obrazujący zmiany granicy plastyczności R_C w zależności od parametrów starzenia standardowego w zakresie temperatury 480÷500°C i czasu od 1 do 4 godzin zamieszczone na rys. 3. Dla zastosowanego zakresu parametrów obróbki cieplnej stwierdzono słabą

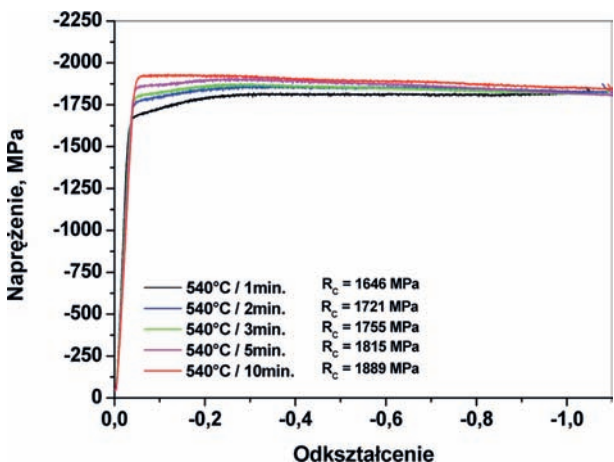


Rys. 3. R_C w funkcji temperatury i czasu starzenia w zakresie temperatury 480÷500°C i czasu 1÷4 godzin

Fig. 3. R_C versus temperature and time of ageing in the range of temperature 480÷500°C and for period of time 1÷4 hours

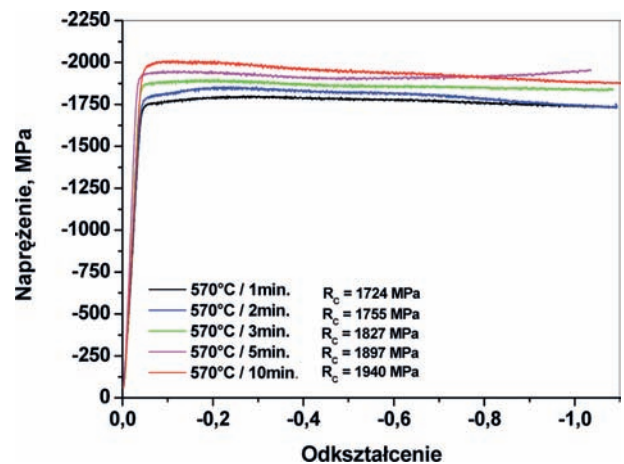
zależność R_C od temperatury, natomiast ze wzrostem czasu starzenia od 1 do 4 godzin wartość R_C wzrosła od 2050 do 2250 MPa. Na powierzchniach bocznych próbek podczas ściskania występowały pęknięcia, których liczba i wielkość umożliwiały kontynuację eksperymentu do osiągnięcia założonej wartości odkształcenia. Stal maraging MS300 po starzeniu w temperaturze z zakresu 480÷500°C w czasie 1÷4 godziny stanowiła materiał odniesienia dla wariantów starzenia krótkotrwałego (czas od 1 do 10 minut) w temperaturze podwyższonej (520÷570°C) w stosunku do standardowej.

Przykładowe krzywe ściskania próbek po starzeniu krótkotrwałym zamieszczono na rys. 4 i 5. Na rys. 6 zamieszczono diagram obrazujący zmiany R_C w funkcji parametrów starzenia. W wyniku starzenia w zakresie temperatury 520÷570°C w czasie od 1 do 10 minut uzyskano wartość R_C od 1550 do 1950 MPa. Dla zastosowanych parametrów starzenia stwierdzono monotoniczny wzrost R_C zarówno ze wzrostem czasu jak i temperatury starzenia. Dla określonego czasu starzenia (do 5 minut) wzrost temperatury od 520 do 570°C powodował podwyższenie R_C o ok. 150 MPa. Dla czasu starzenia 10 minut wzrost wartości R_C spowodowany zwiększeniem temperatury o 50°C wyniósł ok. 100 MPa. Wydłużenie z kolei czasu starzenia od 1 do 10 minut dla temperatury z zakresu 520÷570°C skutkowało



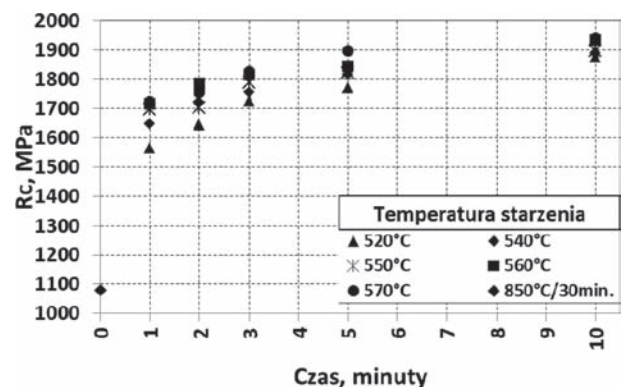
Rys. 4. Krzywe ściskania stali maraging MS300 starzonej w temperaturze 540°C w czasie 1÷10 minut

Fig. 4. Compression curves of MS300 maraging steel aged at the temperature 540°C for period of time 1÷10 minutes



Rys. 5. Krzywe ściskania stali maraging MS300 starzonej w temperaturze 570°C w czasie 1÷10 minut

Fig. 5. Compression curves of MS300 maraging steel aged at the temperature 570°C for period of time 1÷10 minutes



Rys. 6. R_C w funkcji temperatury i czasu starzenia w zakresie temperatury 520÷570°C i czasu 1÷10 minut

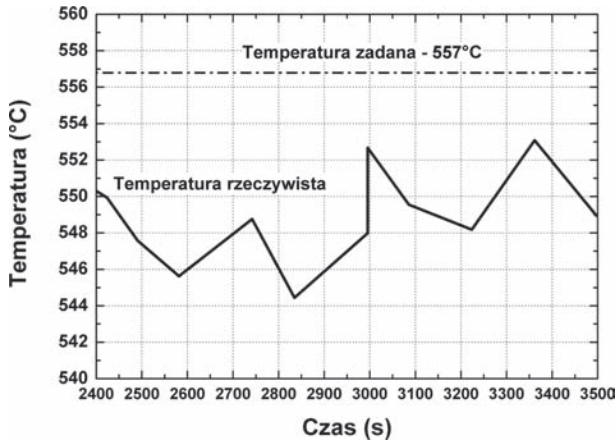
Fig. 6. R_C versus temperature and time of ageing in the range of temperature 520÷570°C and for period of time 1÷10 minutes

wzrostem granicy plastyczności o ok. 250÷300 MPa. W odniesieniu do starzenia standardowego uzyskano niższą wartość granicy plastyczności o ok. 300 MPa, ale próbki starzone krótkotrwałe wykazywały wysoką plastyczność, objawiającą się brakiem pęknięć na powierzchniach bocznych podczas ściskania na zimno.

Na podstawie wyników pomiarów R_C i pomiarów twardości wyznaczono następujące optymalne parametry starzenia krótkotrwałego zapewniające wysoką wytrzymałość i dobrą plastyczność: temperatura 540÷570°C i czas 5÷10 minut.

4.2 WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU PO OBRÓBCE CIEPLNEJ W ZŁOŻU FLUIDALNYM

W złożu fluidalnym umieszczano jednocześnie dwie próbki o grubości 4,3 i 6,6 mm, przeznaczone do starzenia z zastosowaniem jednakowego czasu. Podczas obróbki cieplnej rejestrowano temperaturę złoża. Przykładowy przebieg temperatury złoża zamieszczono na rys. 7. Po umieszczeniu próbek w złożu jego temperatura obniżała się o ok. 10°C. Z uwagi na bezwładność układu i krótki czas obróbki cieplnej, rzeczywista temperatura złoża była niższa od zadanej i zmienna w czasie procesu. W wyniku pomiarów ustalono, że tem-



Rys. 7. Zmiany temperatury złoża w trakcie obróbki cieplnej odcinków blach ze stali maraging MS300 (nagrzewanie przez 7 minut i starzenie przez 10 minut)

Fig. 7. Fluidized bed temperature changes of section of MS300 maraging steel plates during heat treatment (heating for 7 minutes and ageing for 10 minutes)

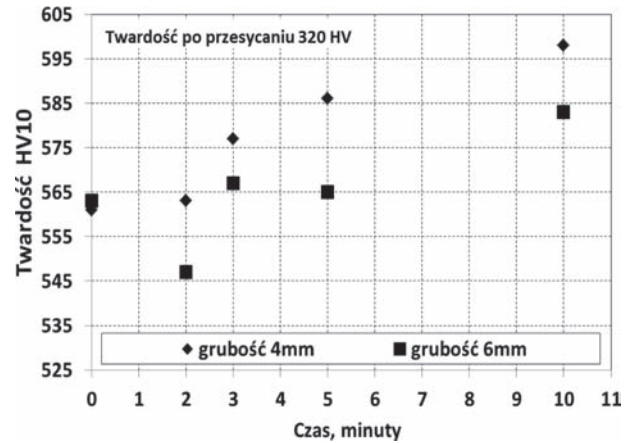
peratura obróbki cieplnej w trakcie krótkotrwałego wygrzewania (do 10 minut) dla zadanej temperatury złoża 557°C, wynosiła od 540°C do 555°C.

Z odcinków blach po obróbce cieplnej fluidalnej wykonano próbki wytrzymałościowe płaskie o grubości 4 i 6 mm. Wyniki pomiarów właściwości wyznaczonych w statycznej próbie rozciągania i pomiarów twardości zamieszczono w tabelicy 3. Podane wartości właściwości są średnią arytmetyczną z trzech lub czterech pomiarów. Twardość zawierała się w zakresie od 547 do 598 HV. Zestawienie otrzymanych wyników badań właściwości mechanicznych i twardości zamieszczono na rys. 8÷10. Twardość i wytrzymałość próbek wzrastała ze wzrostem czasu wygrzewania przy nieznacznym spadku wydłużenia. Dla grubości 4 mm uzyskano $R_{0,2}$ od 1650 do 1800 MPa; R_m od 1750 do 1880 MPa i wydłużenie A odpowiednio od 10 do 8%. Dla grubości 6 mm uzyskano $R_{0,2}$ od 1600 do 1800 MPa; R_m od 1700 do 1900 MPa i wydłużenie A_5 od 11 do 10%. Najwyższą wytrzymałość i granicę plastyczności odpowiednio 1900 i 1800 MPa, osiągnęły próbki o grubości 6 mm starzone przez 10 minut, które charakteryzowały się także wysoką wartością wydłużenia ok. 11%.

Tablica 3. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych i twardości stali maraging MS300 po obróbce cieplnej fluidalnej

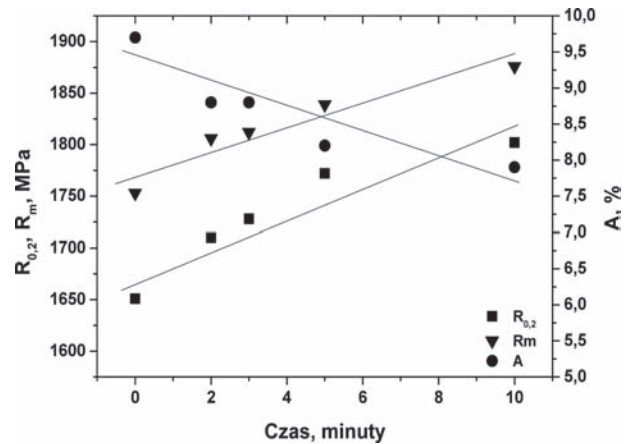
Table 3. Results of mechanical properties and hardness measurements of MS300 maraging steel after fluidized bed heat treatment

Grubość próbki, mm / nr próbki	Twardość HV10	$R_{0,2}$ MPa	R_m MPa	A %
4 / 1	598	1802	1876	7,9
4 / 2	586	1772	1839	8,2
4 / 3	577	1728	1812	8,8
4 / 4	563	1710	1806	8,8
4 / 5	561	1651	1753	9,7
6 / 1	583	1802	1900	10,7
6 / 2	565	1702	1820	10,8
6 / 3	567	1697	1804	11,0
6 / 4	547	1708	1802	10,9
6 / 5	563	1608	1714	11,3



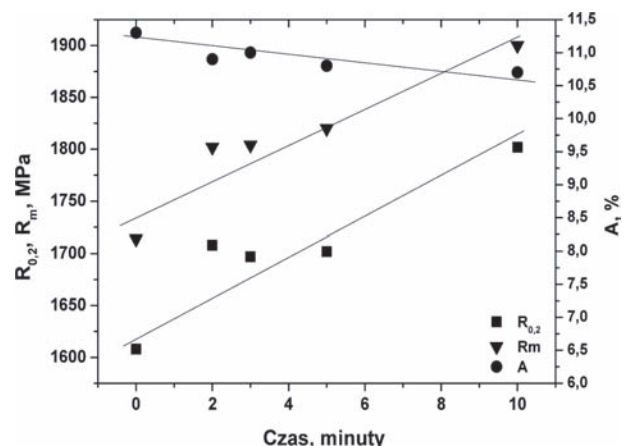
Rys. 8. Twardość w funkcji czasu starzenia w temperaturze 550°C w złożu fluidalnym

Fig. 8. Hardness versus ageing time at temperature of 550°C in the fluidized bed



Rys. 9. Właściwości wytrzymałościowe ($R_{0,2}$ i R_m) i wydłużenie (A) w funkcji czasu starzenia dla temperatury obróbki cieplnej fluidalnej 550°C. Grubość blachy 4,3 mm

Fig. 9. Mechanical properties (yield stress and tensile strength) and elongation (A) versus ageing time for temperature of fluidized bed heat treatment 550°C. Plate thickness 4.3 mm



Rys. 10. Właściwości wytrzymałościowe ($R_{0,2}$ i R_m) i wydłużenie (A) w funkcji czasu starzenia dla temperatury obróbki cieplnej fluidalnej 550°C. Grubość blachy 6,6 mm

Fig. 10. Mechanical properties (yield stress and tensile strength) and elongation (A) versus ageing time for temperature of fluidized bed heat treatment 550°C. Plate thickness 6.6 mm

4.3 WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU PO OBRÓBCE CIEPLNEJ W PIECACH KOMOROWYCH

Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych zamieszczono w tablicy 4. Dla próbek wytrzymałościowych po obróbce cieplnej w piecach komorowych uzyskano zbliżone wartości właściwości jak dla materiału po obróbce fluidalnej, z wyjątkiem wariantu bez wygrzewania. Dla próbek wytrzymałościowych obrabianych w piecach komorowych, czas nagrzewania był krótszy niż dla odcinków blach obrabianych w złożu fluidalnym. Uzyskano $R_{0,2}$ od 1400 do 1800 MPa, R_m od 1500 do 1900 MPa i wydłużenie A odpowiednio od 13 do 8%. Najwyższym wydłużeniem, powyżej 12% charakteryzował się materiał, dla którego zastosowano jedynie nagrzewanie do temperatury 550°C. Próbki starzone przez 10 minut wykazywały najwyższą wytrzymałość $R_{0,2}$ 1800 MPa i R_m 1900 MPa, przy zadawalającym poziomie wydłużenia ok. 9%.

Tablica 4. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych stali maraging MS300 po starzeniu krótkotrwałym w temperaturze 550°C

Table 4. Results of mechanical properties measurements of MS300 maraging steel after short-time ageing at temperature 550°C

Czas starzenia min.	$R_{0,2}$ MPa	R_m MPa	A %
„0”	1388	1470	12,7
„0”	1471	1565	12,3
2	1677	1749	8,3
2	1692	1751	9,0
5	1722	1797	10,3
5	1798	1838	9,7
10	1824	1880	9,3
10	1768	1887	9,3

Wyniki badań udarności na próbkach z karbem typu V o wymiarach 10×10×55 mm (wymiary przekroju w miejscu karbu 8×10 mm) wykonano dla wybranych wariantów starzenia krótkotrwałego (czas: 3 i 10 minut) i dodatkowo dla czasu 15 minut, w temperaturze +22°C i -40°C. Wyniki pomiarów udarności zamieszczone w tablicy 5 podano jako wartość średnią z trzech testów. Stal MS300 po starzeniu krótkotrwałym charakteryzowała się udarnością (wartością pracy łamania) w zakresie 42÷33 J w temperaturze pokojowej,

odpowiednio dla czasu starzenia 3 i 15 minut. W temperaturze -40°C udarność obniżyła się nieznacznie i wynosiła analogicznie od 37 do 28 J.

Tablica 5. Wyniki pomiarów udarności stali maraging MS300 po starzeniu krótkotrwałym w temperaturze 550°C

Table 5. Results of notched impact strength measurements of MS300 maraging steel after short-time ageing at temperature 550°C

Czas starzenia, min.	Temperatura próby, °C	Praca łamania, J
3	+ 22	42
	- 40	37
10	+ 22	36
	- 40	31
15	+ 22	33
	- 40	28

5. PODSUMOWANIE

Wykonano eksperymenty krótkotrwałego starzenia z zastosowaniem złoża fluidalnego, nagrzewania oporowego i w komorowych piecach grzewczych. Przeprowadzone badania wykazały, że dla stali maraging MS300 istnieje możliwość uzyskania pożądanych właściwości w wyniku starzenia krótkotrwałego w temperaturze wyższej od stosowanej standardowo. W wyniku starzenia w zakresie temperatury 540÷560°C w czasie od 5 do 15 minut stal maraging MS300 osiąga następujące właściwości mechaniczne: $R_{0,2}$ 1700÷1800 MPa; R_m 1800÷1900 MPa, wydłużenie A 10%, udarność w temperaturze -40°C 28÷37 J oraz twardość 550÷600 HV. W odniesieniu do właściwości po starzeniu standardowym osiągnięto znacznie wyższy poziom plastyczności (w szczególności udarności) kosztem nieznacznego obniżenia wytrzymałości.

Dla elementów cienkościennych o niewielkich gabarytach preferowanym sposobem realizacji krótkotrwałego starzenia jest obróbka cieplna w złożu fluidalnym. Sposób ten zapewnia stabilność i powtarzalność parametrów procesu, w szczególności w trakcie nagrzewania. W przypadku realizacji procesu w piecach komorowych należy wykonać serię testów obróbki cieplnej elementów z termoparą, w celu doboru warunków nagrzewania.

LITERATURA

- Tewari R., Mazumder S., Batra I.S., Dey G.K. and Banerjee S.: Precipitation in 18 wt. % Ni maraging steel of grade 350. *Acta Materialia*, 48, (2000), pp. 1187-1200
- Guo Z., Sha W., Li D. Quantification of phase transformation kinetics of 18 wt. % Ni C250 maraging steel. *Materials Science and Engineering A*, 373, (2004), pp. 10-20
- 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*, 393, (2005), pp. 109-113
- Sha W. Quantification of age hardening in maraging steels and an Ni-base superalloy, *Scripta mater.*, 42, (2000), pp. 549-553
- Rajkumara K.V., Vaidyanathana S., Kumara A., Jayakumara T., Raja B., Ray K.K.: Characterization of aging-induced microstructural changes in M250 maraging steel using magnetic parameters. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 312, (2007), pp. 359-365
- Pereloma E.V., Shekhter A., Miller M.K., Ringer S.P.: Ageing behaviour of an Fe-20Ni-1.8Mn-1.6Ti-0.59Al (wt%) maraging alloy: clustering, precipitation and hardening, *Acta Materialia*, 52, (2004), pp. 5589-5602
- Shekhter, Aaronson H.I., Miller M.K., Ringer S.P. and Pereloma E.V.: Effect of Aging and Deformation on the Microstructure and Properties of Fe-Ni-Ti Maraging Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, V. 35A, (2004), pp. 973-983
- Rogalski Z.: Obróbka cieplna fluidalna-stan techniki. Cz. 1, *Inżynieria Powierzchni*, (2000), nr 2, s. 3-20
- Rogalski Z.: Obróbka cieplna fluidalna-stan techniki. Cz. 2, *Inżynieria Powierzchni*, (2000), nr 4, s. 3-20
- Jasiński J., Frączek T., Jeziorski L.: Efekty i możliwości stosowania fluidalnej obróbki cieplnej stali. *Inżynieria Materiałowa*, (1995), nr 3-4, s. 102-106
- Marcisz J., Garbarz B., Adamczyk M., Stępień J.: Zgłoszenie patentowe pt.: „Sposób krótkotrwałej obróbki cieplnej stali umacnianej wydzieleniowo”, oznaczone w Urzędzie Patentowym RP numerem P.401621, 2012