

JERZY SALBERT

Katedra Metaloznawstwa

WPŁYW WYŻARZANIA W ZAKRESIE TEMPERATUR 350+550°C
NA KRUCHOŚĆ STOPU H25J5

Streszczenie. Stop Fe-Cr-Al o oznaczeniu H25J5 poddano wyżarzaniu w zakresie temperatur 350+550°C w czasie 2+300 godzin. Przeprowadzono badania mechaniczne oraz metalograficzne próbek wyżarzonych, celem określenia wpływu tej obróbki cieplnej na kruchość badanego stopu. Przedstawione wykresy zmian wytrzymałości, wydłużenia, przewężenia, uderzalności i twardości pod wpływem temperatury i czasu wyżarzania. Stwierdzono podobieństwo przebiegu zmian własności mechanicznych badanego stopu do zmian towarzyszących tzw. "kruchości - 475" stopów podwójnych Fe-Cr.

1. Wstęp

Stop H25J5 jest ferrytycznym stopem żaroodpornym, przeznaczonym na elementy grzejne pieców elektrycznych pracujących do temperatur około 1250°C. Stopy tego rodzaju są stopami zastępczymi drogich stopów austenitycznych na osnowie niklu.

Obok wielu korzystnych cech, stopy oporowe ferrytyczne wykazują znaczną kruchość, która utrudnia technologię kształtowania elementów grzejnych, jak również obniża ich trwałość. Zagadnienie kruchości tych stopów, posiadające istotnie znaczenie praktyczne i teoretyczne, nie jest jeszcze dostatecznie wyjaśnione. Kwestią otwartą jest między innymi kruchość tych stopów w temperaturze 475°C; opublikowane do tej pory liczne prace z zakresu kruchości - 475 dotyczą prawie wyłącznie stopów podwójnych Fe-Cr.

Ferrytyczna struktura oraz wysoka zawartość chromu stopów oporowych pozwalają przypuszczać, że tego rodzaju kruchość występuje również w badanym stopie H25J5. Celem przekonania się

c słuszności tych przypuszczeń podjęto systematyczne badania, których pierwszy etap opisano w niniejszej pracy.

2. Kruchość ferrytycznych stopów Fe-Cr w temperaturze 475°C

Ferrytyczne oraz półferrytyczne stopy Fe-Cr, zawierające około 15-80% chromu, wygrzewane przez odpowiedni okres czasu w temperaturach od 400÷550°C wykazują znaczną kruchość oraz wyraźne zmiany szeregu innych własności mechanicznych. Zmiany te obserwuje się najwyraźniej podczas grzania w pobliżu temperatury 475°C i dlatego zjawisko to nazwano "kruchością - 475"^x).

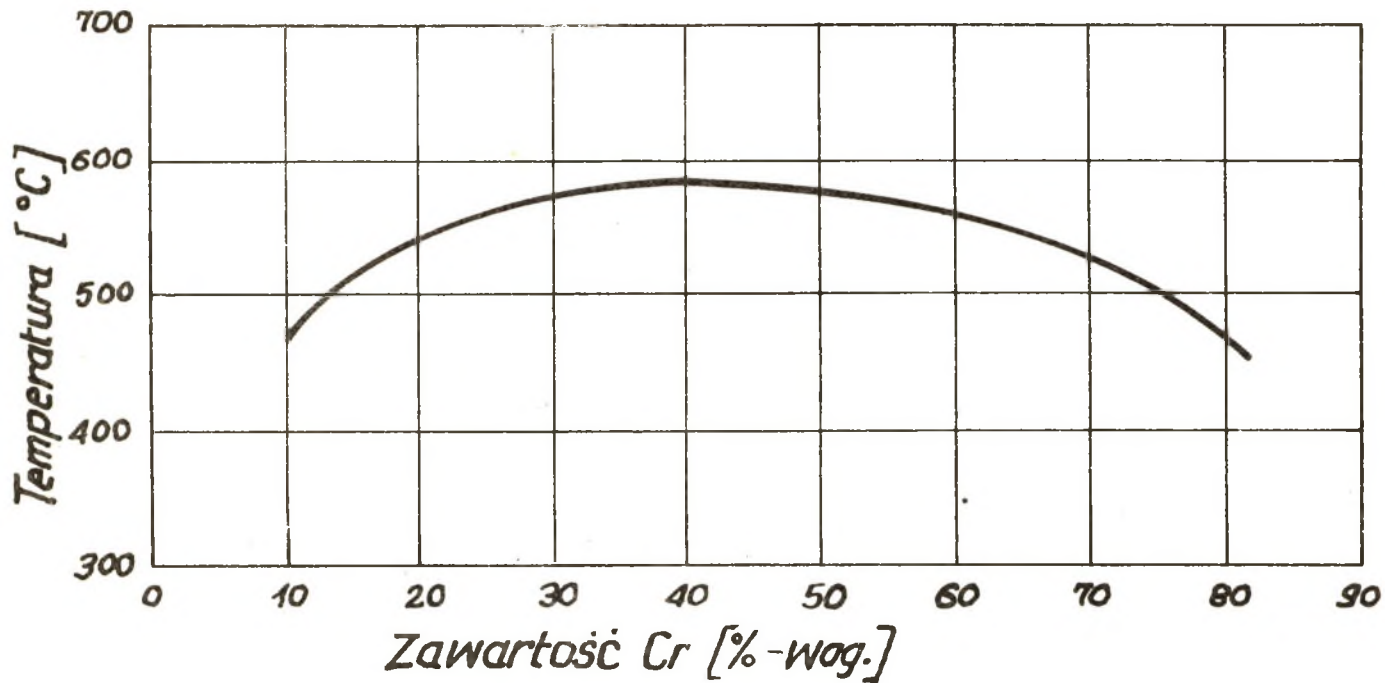
Poza kruchością objawiającą się gwałtownym spadkiem udarności oraz własności plastycznych, zjawisku temu towarzyszy wyraźny wzrost twardości i wytrzymałości [1], [2], przy czym twardość omawianych stopów stale rośnie ze wzrostem czasu wygrzewania w danej temperaturze; nawet po 5000 godzin grzania nie stwierdzono jeszcze spadku twardości [3].

Podczas grzania stopów wysokochromowych w podanym zakresie temperatur zaobserwowano również wyraźne zmiany własności fizyko-chemicznych. Stwierdzono wzrost objętości właściwej [3], [4] przewodności elektrycznej [5], [6] oraz podwyższenie siły koercji [1], [2], temperatury Curie [3], [4] i [7] i nasycenia magnetycznego [7]. Zjawisko kruchości - 475 związane jest również z obniżeniem odporności korozyjnej stali [2].

Badania nad zakresem koncentracji oraz górną temperaturą występowania tego zjawiska wykazały, że kruchość - 475 występuje w stalach Fe-Cr zawierających od około 10÷80%Cr, przy czym górna temperatura występowania tej kruchości leży pomiędzy 500 i 575°C - rys. 1.

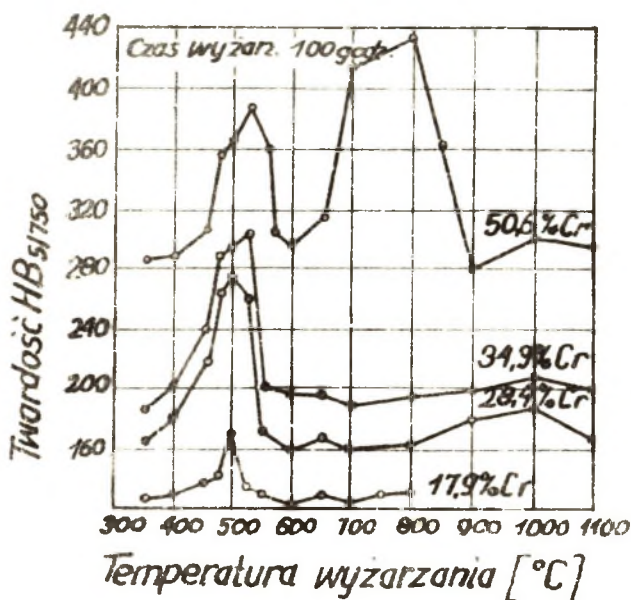
Pierwsze prace opisujące zjawiska kruchości - 475 opublikowano na przełomie lat trzydziestych i czterdziestych [8, 9, 10, 11 i 12], a w miarę upływu czasu pojawiły się nowe publikacje z tego zakresu. Jakkolwiek wyniki opublikowanych na przestrzeni

^x) Termin "kruchość - 475" przyjęto na podstawie określeń podanych w literaturze źródłowej: angielskiej - "885°F embrittlement" oraz niemieckiej - "475 - Versprödung".



Rys. 1. Górna granica występowania zjawiska "kruchości - 475" w stopach Fe-Cr o różnej zawartości Cr (5)

30 lat prac są na ogół zgodne co do zakresu oraz stopnia zmian własności towarzyszących temu zjawisku, brak jeszcze do chwili obecnej dostatecznego i jednoznacznego wyjaśnienia jego przyczyny. Wyniki przeprowadzonych badań, w każdym razie, wykluczają możliwość istnienia bezpośredniego związku pomiędzy opisaną kruchością oraz fazą σ , której tworzenia nie obserwuje się jeszcze w temperaturach w których kruchość - 475 zanika. Pomiarzy twardości stopów Fe-Cr wyżarzonych w temperaturach od 350 do 1000°C ujawniły wyraźne rozdzielanie zakresów temperatur obydwu zjawisk (rys. 2). Na brak tego rodzaju związku wskazują



Rys. 2. Wpływ temperatury wyżarzania na twardość stopów Fe-Cr [1]

również dalsze fakty. Kruchość - 475 związana jest ze wzrostem nasycenia magnetycznego, gdy natomiast wydzielanie się fazy σ powoduje gwałtowne jego obniżenie. Zmiany objętości właściwej przebiegają również w kierunku przeciwnym w obydwu procesach.

Według wielu autorów [13, 14, 15], istnieje jednak pośrednie powiązanie pomiędzy kruchością w temperaturze 475°C, a fa-

zą δ . Postulują oni, że kruchość - 475 wywołana jest tworzeniem się niestabilnej fazy pośredniej, poprzedzającej wydzielenie fazy δ . Pogląd taki poparty jest istotnym materiałem doświadczalnym. Badania izolatów wykazały, że kruchość - 475 związana jest z wydzieleniem bardzo drobnych, koherentnych z osnową ferrytyczną kompleksów zawierających około 80% Cr. Kompleksy te posiadają sieć kubiczną przestrzennie centryczną o parametrze 2,878 Å. Zwiększony w porównaniu z ferrytem parametr sieci wywołuje lokalne naprężenia, które tłumaczą opisany wzrost twardości i kruchości. Zaobserwowane kompleksy rozrastają się bardzo powoli i po 34 000 godzinach grzania wielkość ich wynosi zaledwie 5000 Å. Powolny rozrost tych kompleksów uzasadnia z kolei stały wzrost twardości stopów ferrytycznych ze wzrostem czasu grzania i upodabnia opisane zjawisko kruchości do procesu starzenia samorzutnego stopów Al-Cu [1].

Opisane zjawiska dotyczą stopów dwuskładnikowych Fe-Cr, względnie ferrytycznych lub półferrytycznych stali chromowych, jak również stali austenitycznych zawierających ferryt δ . W czystych stalach austenitycznych zjawiska kruchości - 475 nie stwierdzono [1].

W stopach potrójnych Fe-Cr-Al zagadnienie kruchości - 475 nie jest jeszcze wyjaśnione. Na podstawie podanych w literaturze [5] informacji można jednak przypuszczać, że w tego rodzaju stopach zjawisko to występuje, przynajmniej przy zawartościach Al poniżej 5%, w przeciwieństwie do niespotykanej nigdy w tych stopach fazy δ .

3. Badania własne

Celem pracy jest wyjaśnienie, czy i w jakim stopniu znana w stopach Fe-Cr kruchość w temperaturze 475°C występuje w stopie Fe-Cr-Al o oznaczeniu H25J5, poprzez zbadanie zmian własności mechanicznych i struktury po wyżarzaniu w zakresie 350÷550°C.

Do badań użyte stopu produkcji Huty Baildon, tzw. Baildonalu 12, którego skład chemiczny podano w tablicy 1. Struktura

rę badanego stopu w stanie surowym stanowią drobne węgliki na tle ferrytu.

Tablica 1

Skład chemiczny badanego stopu										
Oznaczenie	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Ni	%Ti	%Cr	%Al	%Fe
H25J5	0,12	0,47	0,80	0,035	0,01	0,3	0,05	24,5	4,8	resz- ta

3.1. Przebieg badań

Materiał przeznaczony do badań na wstępie poddano przesycaaniu z temperatury 800°C, oziębiając próbki w wodzie po 2 godzinny wygrzaniu. Warunki przesycaania dobrano na podstawie badań wstępnych w taki sposób, ażeby przez przesycaanie usunąć jedynie ewentualne zmiany zaistniałe w roztworze stałym (tworzenie kompleksów wzbogaconych w chrom) podczas powolnego studzenia stopu z temperatury przeróbki plastycznej, a nie spowodować rozrostu ziarn ferrytu oraz rozpuszczenia węglików, celem uniknięcia wpływu wielkości ziarn oraz wydzielenia węglików na własności mechaniczne próbek po wyżarzaniu w zakresie 350-550°C. Z przesyconego materiału wykonano próbki, które następnie poddano wyżarzaniu w temperaturach 350, 400, 450, 470, 500 i 550°C w czasie 2, 3, 5, 20, 30, 100 i 300 godzin, każdorazowo oziębiając je w wodzie. Obróbkę cieplną przeprowadzono w elektrycznym piecu komorowym o mocy 4kW, wyposażonym w urządzenie do automatycznej regulacji temperatury z dokładnością $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Obrobione cieplnie próbki poddawano dalszym badaniom, a w szczególności próbie rozciągania i udarności, pomiarom twardości oraz metalograficznym. Powierzchnie próbek przeznaczonych do rozciągania oraz badań udarności szlifowano, celem wyeliminowania wpływu stanu powierzchni na wyniki. Szlifowanie powierzchni miało szczególne znaczenie dla próbek udarnościowych, które ze względu na niską udarność stopu wykonano bez karbu; stosownie w takim przypadku próbek nieszlifowanych daje bowiem znaczny rozrzut wyników. Również z uwagi na niską udar-

ność próbek wyżarzonych badanie udarności przeprowadzono na młocie o maksymalnej energii równej 7 kGm.

3.2. Wyniki badań

Badania mechaniczne

Przeprowadzone badania pozwoliły ujawnić zmiany twardości, udarności, wytrzymałości, wydłużenia oraz przewężenia badanego stopu podczas wyżarzania w zakresie temperatur 350÷550°C. Szczegółowy przebieg tych zmian w zależności od temperatury i czasu wyżarzania przedstawiono w tablicy 2 oraz graficznie na Rys. 3, 4, 5, 6 i 7. Punkty na wykresach stanowią wartości średnie conajmniej trzech pomiarów. Z tablicy oraz wykresów wynika, że pod wpływem wzrostu czasu wyżarzania następuje systematyczny wzrost twardości i wytrzymałości oraz spadek wydłużenia, przewężenia i udarności próbek. Wpływ czasu objawia się najsilniej podczas grzania w temperaturze 470°C, w której już po 2 godzinach widoczne jest wyraźne obniżenie udarności, wydłużenia i przewężenia. Wyraźny jest także wpływ czasu na własności mechaniczne podczas wyżarzania próbek w temperaturach 450 i 500°C, jednak wielkości zmian w tych samych czasach, w porównaniu z temperaturą 470°C są mniejsze.

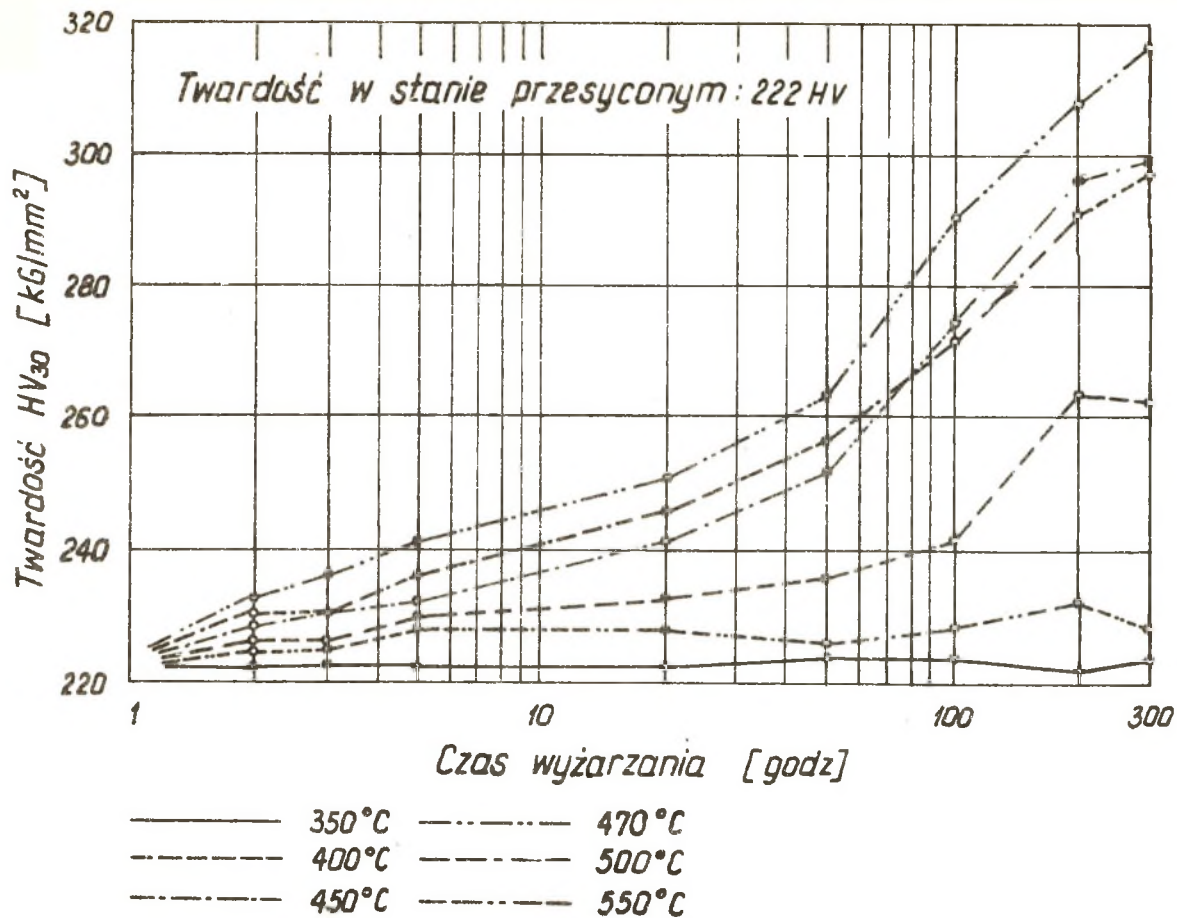
Natomiast w temperaturach poniżej 450°C oraz powyżej 500°C zmiany badanych wielkości pod wpływem czasu zachodzą znacznie wolniej, szczególnie zaś wytrzymałości i twardości. Praktycznie można przyjąć, że dla temperatur 350 i 550°C nie stwierdzono zmian wytrzymałości i twardości w badanym zakresie czasu. W temperaturze 350°C nie stwierdzono także zmian wydłużenia oraz przewężenia próbek.

Ogólnie należy stwierdzić, że spośród badanych wielkości najszybciej zmienia się udarność oraz wydłużenie i przewężenie, zaś najwolniej wytrzymałość. O ile np. w temperaturze 470°C, udarność spadła prawie do zera już po 2 godzinach grzania, to zmiany wytrzymałości są dostrzegalne dopiero po 20 godzinach.

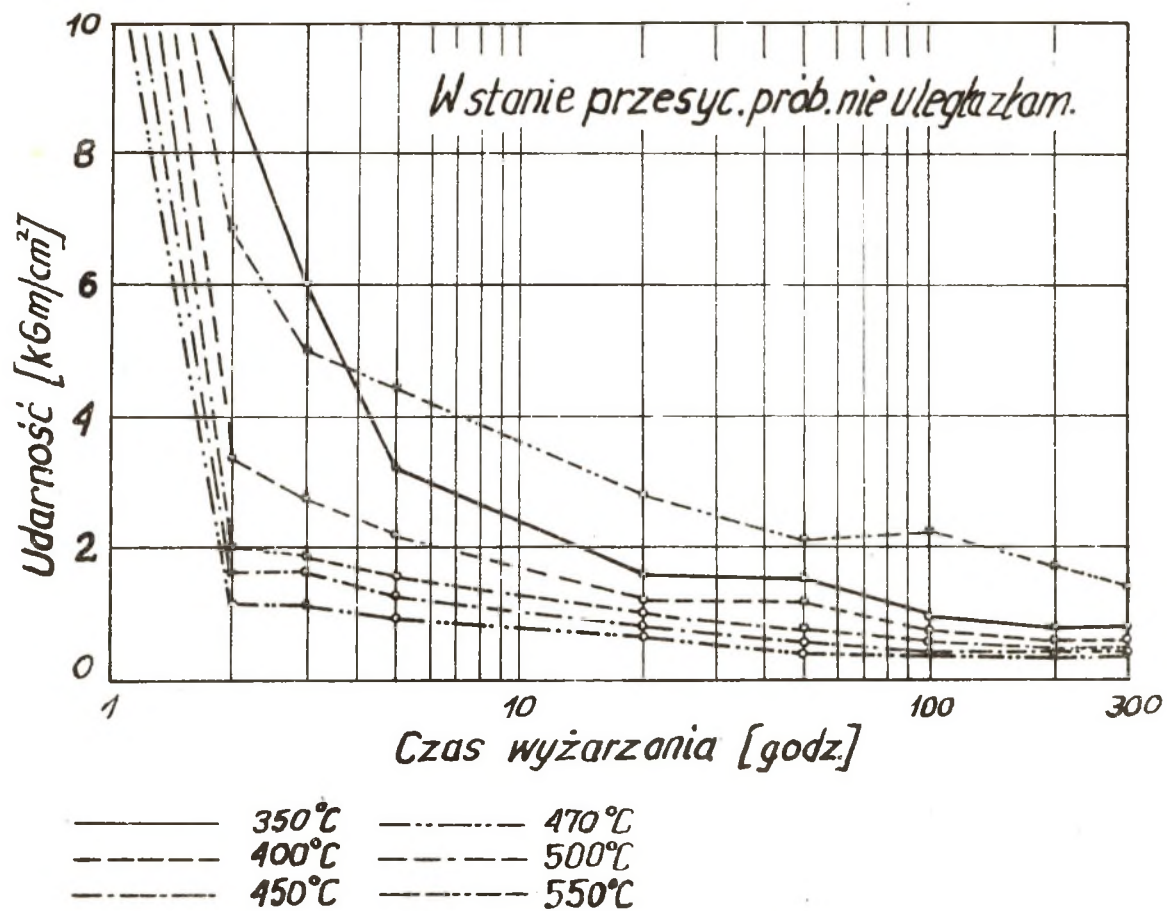
Tablica 2

Zestawienie wyników badań mechanicznych w zależności od warunków obróbki cieplnej

Lp.	Warunki obróbki cieplnej	R_m kg/mm ²	Wydłużenie A_5 %	Przewężenie Z %	Twardość HV _{0,05}	Uderność kgm/cm ²
1	2	3	4	5	6	8
1	Stan surowy	70,0	25,0	50,0	240	Próbka nie uległa złamaniu
2	800°C/2godz - woda	70,5	27,0	51,5	222	
3	800°C/2godz - powietrze	64,0	26,0	48,0	226	0,9
4	800°C/2godz - piec	61,5	0	0	241	0,6
5	800°C/2godz - woda+350°C/2godz - woda	72,0	27,0	50,0	222	Próbka nie uległa złamaniu
6	800°C/2godz - woda+350°C/3godz - woda	72,0	26,0	50,0	222	5,0
7	800°C/2godz - woda+350°C/5godz - woda	72,5	26,0	48,0	222	3,2
8	800°C/2godz - woda+350°C/20godz - woda	52,5	26,0	47,0	222	1,6
9	800°C/2godz - woda+350°C/50godz - woda	72,0	0	0	224	1,6
10	800°C/2godz - woda+350°C/100godz - woda	71,5	0	0	223	1,0
11	800°C/2godz - woda+350°C/200godz - woda	71,0	0	0	221	0,8
12	800°C/2godz - woda+350°C/300godz - woda	72,5	0	0	224	0,8
13	800°C/2godz - woda+400°C/2godz - woda	71,5	25,0	48,0	226	3,4
14	800°C/2godz - woda+400°C/3godz - woda	72,0	22,5	40,0	226	2,8
15	800°C/2godz - woda+400°C/5godz - woda	71,5	0	0	230	2,2
16	800°C/2godz - woda+400°C/20godz - woda	71,5	0	0	232	1,2
17	800°C/2godz - woda+400°C/50godz - woda	72,0	0	0	236	1,2
18	800°C/2godz - woda+400°C/100godz - woda	72,0	0	0	241	0,8
19	800°C/2godz - woda+400°C/220godz - woda	73,5	0	0	264	0,6
20	800°C/2godz - woda+400°C/300godz - woda	74,5	0	0	264	0,6
21	800°C/2godz - woda+450°C/2godz - woda	71,0	24,5	47,0	228	1,6
22	800°C/2godz - woda+450°C/3godz - woda	71,0	21,0	38,0	230	1,6
23	800°C/2godz - woda+450°C/5godz - woda	70,5	0	0	232	1,3
24	800°C/2godz - woda+450°C/20godz - woda	71,0	0	0	241	0,8
25	800°C/2godz - woda+450°C/50godz - woda	73,5	0	0	252	0,6
26	800°C/2godz - woda+450°C/100godz - woda	74,5	0	0	274	0,4
27	800°C/2godz - woda+450°C/200godz - woda	75,5	0	0	296	0,4
28	800°C/2godz - woda+450°C/300godz - woda	76,0	0	0	298	0,4
29	800°C/2godz - woda+470°C/2godz - woda	72,5	19,0	29,5	232	1,1
30	800°C/2godz - woda+470°C/3godz - woda	73,0	0	0	236	1,1
31	800°C/2godz - woda+470°C/5godz - woda	72,5	0	0	241	0,9
32	800°C/2godz - woda+470°C/20godz - woda	74,5	0	0	252	0,9
33	800°C/2godz - woda+470°C/50godz - woda	78,0	0	0	264	0,5
34	800°C/2godz - woda+470°C/100godz - woda	80,0	0	0	291	0,4
35	800°C/2godz - woda+470°C/200godz - woda	80,5	0	0	309	0,4
36	800°C/2godz - woda+470°C/300godz - woda	81,5	0	0	318	0,4
37	800°C/2godz - woda+500°C/2godz - woda	72,0	24,0	46,0	230	2,0
38	800°C/2godz - woda+500°C/3godz - woda	73,0	20,0	35,0	230	1,8
39	900°C/2godz - woda+500°C/5gc - z - woda	73,0	0	0	236	1,6
40	800°C/2godz - woda+500°C/20godz - woda	73,0	0	0	246	1,0
41	800°C/2godz - woda+500°C/50godz - woda	74,5	0	0	256	0,6
42	800°C/2godz - woda+500°C/100godz - woda	75,0	0	0	272	0,6
43	800°C/2godz - woda+500°C/200godz - woda	76,5	0	0	291	0,4
44	800°C/2godz - woda+500°C/300godz - woda	77,0	0	0	296	0,4
45	800°C/2godz - woda+550°C/2godz - woda	71,5	27,0	51,5	224	7,0
46	800°C/2godz - woda+550°C/3godz - woda	71,5	27,0	51,5	224	5,0
47	800°C/2godz - woda+550°C/5godz - woda	71,5	27,0	51,5	228	4,4
48	800°C/2godz - woda+550°C/20godz - woda	72,0	27,0	51,5	228	2,8
49	800°C/2godz - woda+550°C/50godz - woda	71,5	26,0	49,0	225	2,2
50	800°C/2godz - woda+550°C/100godz - woda	71,5	26,0	48,0	228	2,3
51	800°C/2godz - woda+550°C/200godz - woda	71,5	27,0	51,0	232	1,8
52	800°C/2godz - woda+550°C/300godz - woda	72,0	27,0	51,0	228	1,4
53	800°C/2godz - woda+470°C/200godz - woda +560°C/10 min - woda	-	-	-	275	-
54	800°C/2godz - woda+470°C/200godz - woda +570°C/10 min - woda	-	-	-	225	-

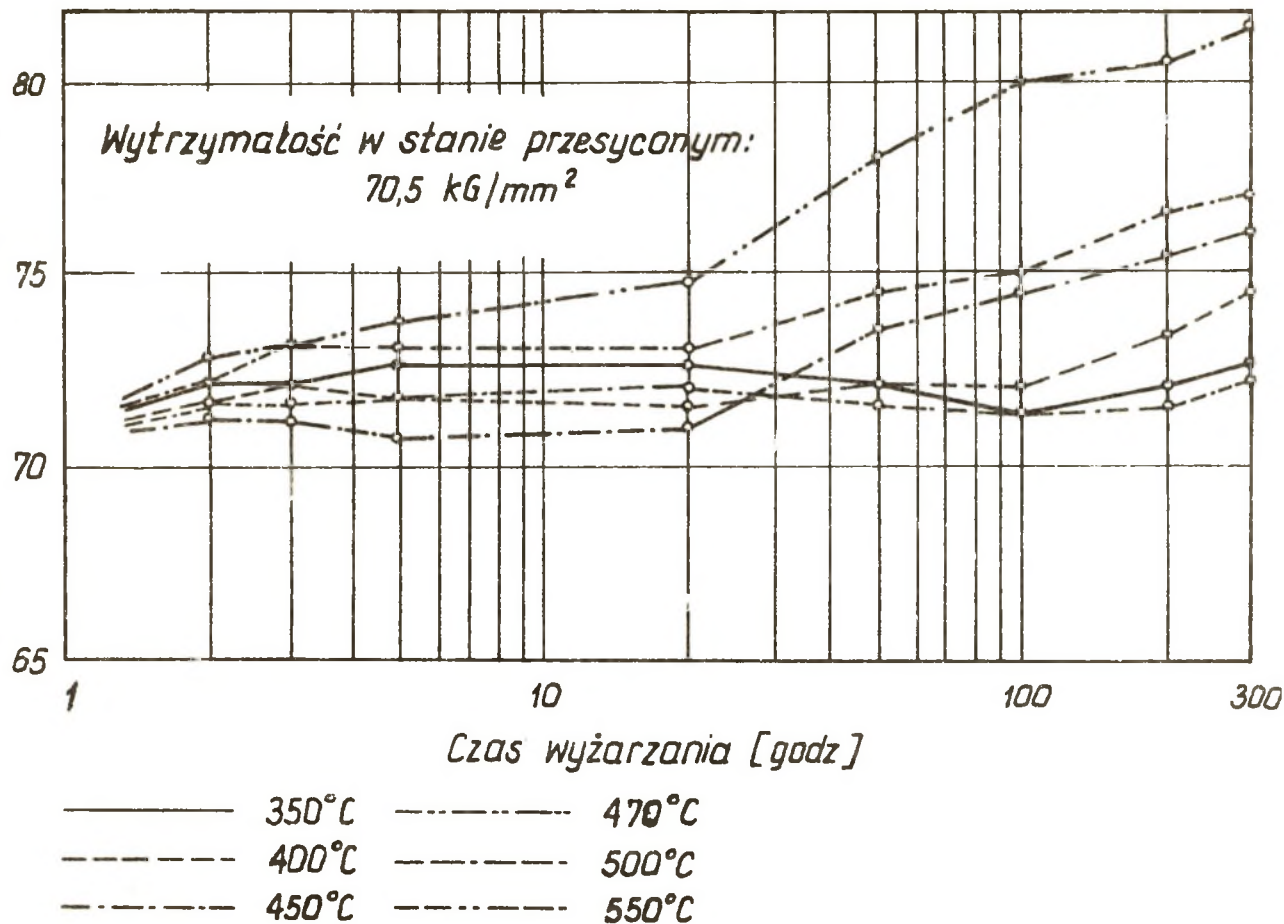


Rys. 3. Wpływ czasu wyżarzania w zakresie 350+550°C na twardość stopu H25J5



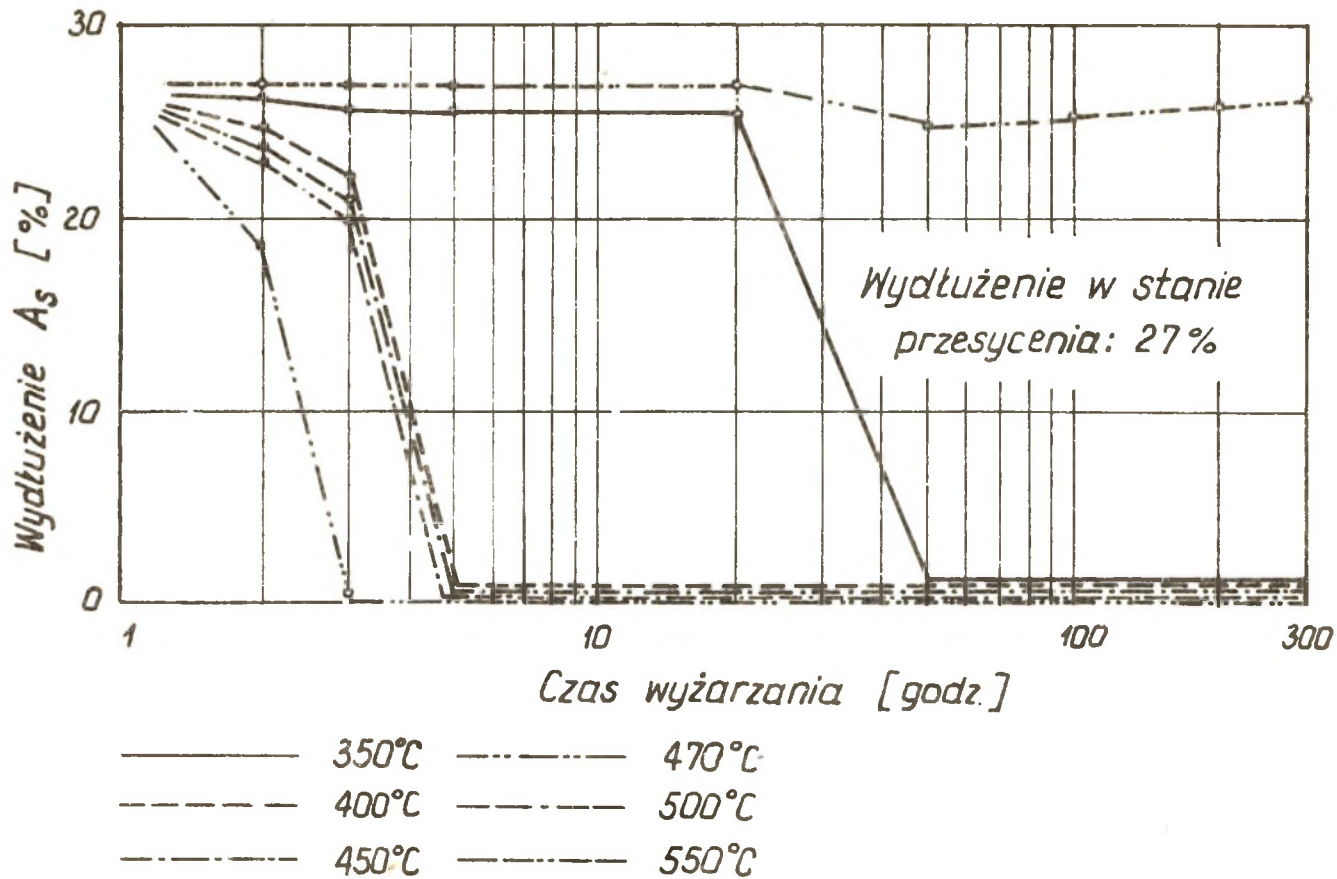
Rys. 4. Wpływ czasu wyżarzania w zakresie 350+550°C na udarność stopu H25J5

Wytrzymałość na rozciąganie [kg/mm²]

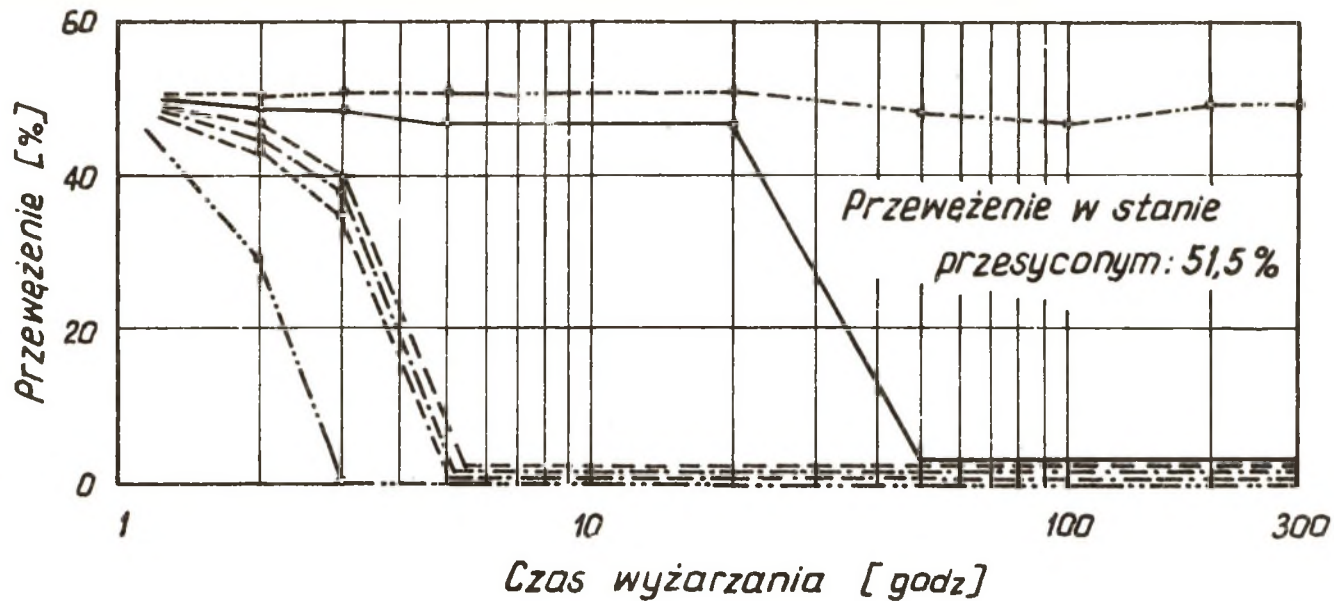


Rys. 5. Wpływ czasu wyżarzania w zakresie 350÷550°C na wytrzymałość stopu H25J5

Wpływ wyżarzania w zakresie temperatur 350÷550°C...



Rys. 6. Wpływ czasu wyżarzania w zakresie 350+550°C na wydłużenie stopu H25J5



Rys. 7. Wpływ czasu wyżarzania w zakresie 350÷500°C na przewężenie stopu H25J5

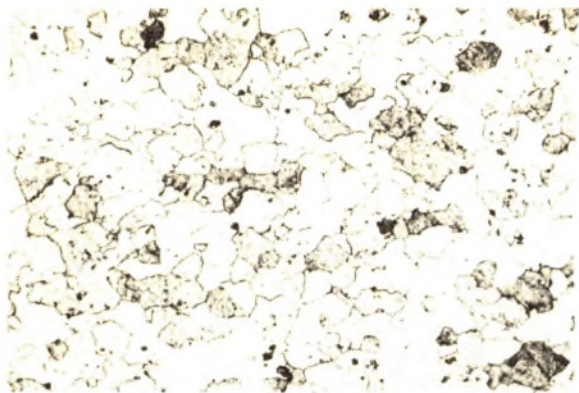
Badania metalograficzne

Badania metalograficzne przeprowadzono na mikroskopie optycznym przy powiększeniu 100 i 500 x oraz elektronowym w zakresie powiększeń 3÷10 tysięcy razy, stosując repliki węglowe. Badaniom poddano próbki w stanie surowym, przesyconym oraz wyżarzony w temperaturze 470°C po przesyconiu. Zgłady trawiono w odczynniku o składzie 2 g FeCl₃, 50 cm³ HCl i 50 cm³ C₂H₅OH w czasie 20÷30 sekund. Strukturę stopu w stanie surowym stanowią ziarna ferrytu oraz drobne węgliki wydzielone wewnątrz oraz częściowo na granicach ziarn - rys. 8. Przesyconie próbek w 800°C/2godz. nie zmienia zasadniczo struktury w porównaniu ze stanem surowym; po przesyconiu stop wykazuje nadal strukturę ferrytyczną z drobnymi węglkami - rys. 9, przy czym zarówno wielkość ziarn ferrytu jak i ilość węglików nie ulega zmianie. Badania metalograficzne próbek wyżarzonych w temperaturze 470°C nawet po 300 godzinach nie ujawniły istotnych zmian struktury w porównaniu ze stanem przesyconym. Na próbkach wyżarzonych stwierdzono jedynie poszerzenie granic ziarn ferrytu oraz nieliczne kryształy bliźniacze oraz linie Neumanna - rys. 10 i 11. Poszerzenie granic ziarn ferrytu uwidacznia się szczególnie wyraźnie podczas obserwacji na mikroskopie elektronowym - rys. 12 i 13. Przy pomocy mikroskopu elektronowego stwierdzono ponadto charakterystyczną podstrukturę ziarn ferrytu.

Należy podkreślić, że przeprowadzone obserwacje, zarówno optyczne jak i przy pomocy mikroskopu elektronowego, nie ujawniły zmian strukturalnych mogących scharakteryzować proces wydzieleniowy. Widoczne węgliki w strukturze próbek poddanych długotrwałemu wyżarzaniu występują również w strukturze stopu bezpośrednio po przesyconiu.

3.3. Badania uzupełniające

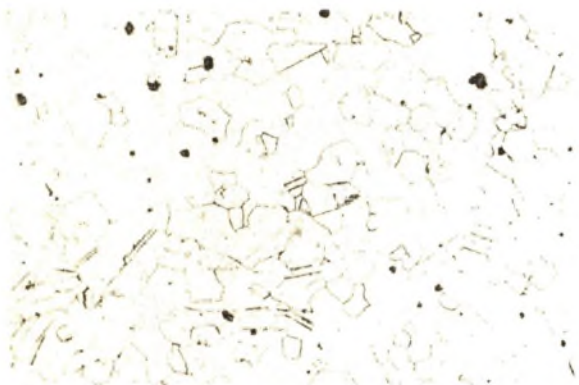
Celem pełniejszego zaobserwowania wpływu czasu na przebieg zmian badanych wielkości, próbki chłodzono z temperatury przesyconia dodatkowo z różnymi prędkościami a to w wodzie, spokojnym powietrzu oraz z piecem i następnie poddano badaniom mecha-



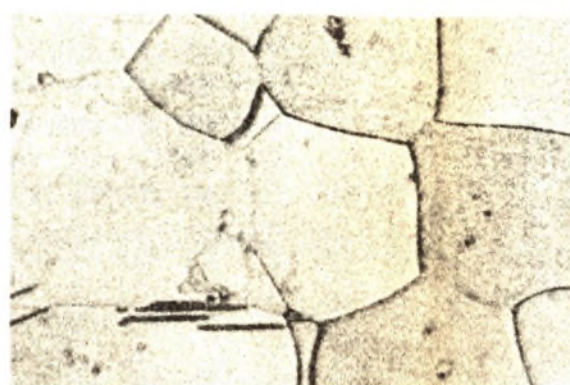
Rys. 8



Rys. 9



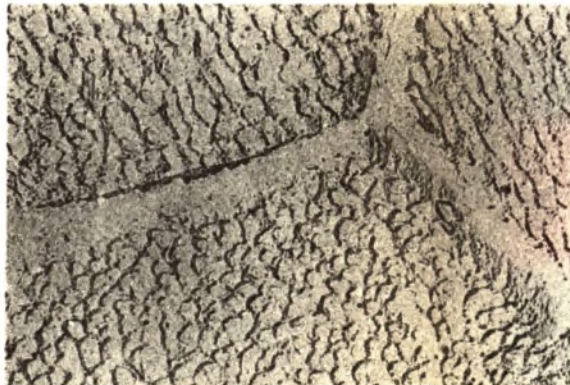
Rys. 10



Rys. 11



Rys. 12



Rys. 13

Opis struktury

Nr rys.	Obróbka cieplna	Powiększenie	Opis struktury
8	Stan surowy	100 x	Ferryt o różnym zaciemnieniu ziarn oraz drobne węgliki
9	800°C/2godz - woda	100 x	Ferryt oraz węgliki
10	800°C/2godz woda+470°C/ 300 godz. - woda	100 x	Ferryt oraz węgliki; miejscami widoczne utwory bliźniacze
11	800°C/2godz woda+470°C/ 300godz. - woda	500 x	Ziarna ferrytu o wyraźnie pogrubionych granicach oraz utwory bliźniacze
12	800°C/2godz - woda	4000 x	Granice ziarn ferrytu w stanie przesyconym (jasne wydzielenia - nierozpuszczone węgliki)
13	800°C/2godz - woda + 470°C/300godz -woda	5000 x	Poszerzanie granic ziarn ferrytu na skutek wyżarzania, ponadto widoczna podstruktura ferrytu

nicznym. Na skutek różnych prędkości chłodzenia, próbki w różnych czasach podlegały działaniu krytycznych temperatur w pobliżu 475°C.

Przeprowadzone badania ujawniły wyraźne różnice własności mechanicznych w zależności od prędkości chłodzenia, a tym samym wykazały, że zmiany badanych własności zachodzą w pobliżu temperatury 475°C praktycznie bez okresu inkubacji. Szczegółowe wyniki tych badań zestawiono w tablicy 2. Ponadto przeprowadzono badania dodatkowe dla stwierdzenia podobieństwa badanych zjawisk do kruchości - 475 stopów podwójnych Fe-Cr, w których to zmiany własności mechanicznych towarzyszące temu zjawisku zanikają całkowicie w temperaturach powyżej 560°C. W tym celu dwie próbki badanego stopu wyżarzonego w temperaturze 470°C w czasie 200 godzin poddano 10 minutowemu wyżarzaniu w temperaturach 560 i 570°C. Przeprowadzone następnie pomiary twardości wykazały, że wygrzewanie w temperaturze 560°C powoduje obniżenie początkowej twardości 309HV do 275HV, zaś w temperaturze 570°C do 225HV, tj. prawie do wartości jaką wykazują próbki bezpośrednio po przesyleniu.

3.4. Dyskusja wyników i wnioski

Badania wykazały wyraźne zmiany szeregu własności mechanicznych stopu H25J5 pod wpływem wyżarzania w zakresie temperatur 400÷500°C. Stwierdzono gwałtowny wzrost kruchości, objawiający się spadkiem udarności, wydłużenia i przewężenia, połączony ze znacznym wzrostem twardości i wytrzymałości na rozciąganie.

Zaobserwowane zmiany zachodzą najszybciej w temperaturze około 470°C, praktycznie bez okresu inkubacji. Jak wynika z dalszych badań już podczas chłodzenia próbek z temperatury przesylenia na powietrzu, powodujące zaledwie kilkusekundowe przebywanie ich w pobliżu temperatury 475°C, następuje gwałtowne obniżenie udarności oraz własności plastycznych, zaś podczas studzenia próbek z piecem własności te spadają praktycznie do zera. Również znaczny jest wpływ czasu na przebieg badanych wielkości podczas wyżarzania w temperaturach 450 i 500°C; jednak w porównaniu z temperaturą 470°C wielkości powstałych w

tym samym czasie zmian są mniejsze - rys. 3, 4, 5, 6 i 7. Zmiany własności mechanicznych powstałe podczas wyżarzania badanego stopu w zakresie $400+500^{\circ}\text{C}$ zanikają zupełnie po kilkunastuminutowym wyżarzaniu w temperaturze powyżej 560°C . Badania metalograficzne nie ujawniły wyraźnych zmian w strukturze w postaci procesów wydzieleniowych. Chcąc więc za przyczynę zaistniałych zmian własności przyjąć proces starzenia należy założyć, że przebiega on w jednorodnej fazie, podobnie jak proces starzenia samorzutnego stopów Al-Cu. Za słuszością takiego poglądu przemawiają również ciągły wzrost twardości i wytrzymałości badanego stopu ze wzrostem czasu wyżarzania, brak okresu inkubacji stwierdzonych zmian oraz niezwykle szybki zanik tych zmian w temperaturach powyżej 560°C . Ujawnione w czasie obserwacji zglądów poszerzenie granic ziarn pozwala przypuszczać, że wspomniane procesy, stanowiące początek rozpadu roztworu stałego, zachodzą głównie na granicach ziarn czyli w miejscach silnie zdefektowanych.

Zaobserwowane zmiany własności mechanicznych, a także zmiany w strukturze badanego stopu podczas wyżarzania w zakresie $400+500^{\circ}\text{C}$ pokrywają się w znacznym stopniu z podanymi w literaturze wynikami badań otrzymanych dla stopów podwójnych Fe-Cr [1], [2], [5].

Zarówno kierunek przebiegu badanych zjawisk, jak również ich temperaturowe oraz czasowe charakterystyki wykazują całkowitą zbieżność. Pozwala to z dużym prawdopodobieństwem przypuszczać, że stwierdzone w stopach Fe-Cr kruchość - 475 występuje również w badanym stopie Fe-Cr-Al.

Dla całkowitego potwierdzenia tych przypuszczeń podjęto dodatkowe badania fizyczne oraz elektronowe przy zastosowaniu cienkich folii, które pozwoliłyby także ustalić przyczynę tej kruchości. Ze względu na pewne możliwości oddziaływania aluminium na przebieg opisanych zjawisk zaplanowano również powtórzenie opisanych badań na stopach Fe-Cr-Al, zawierających różną zawartość aluminium przy stałej zawartości chromu, celem określenia ewentualnego wpływu aluminium. Wyniki tych badań zostaną opublikowane po ich ukończeniu.

Z przeprowadzonych dotychczas badań wynikają następujące wnioski:

1. Wyżarzanie stopu H25J5 w zakresie temperatur 400+500°C wywołuje wyraźne zmiany szeregu własności mechanicznych, a w szczególności spadek udarności i własności plastycznych oraz wzrost twardości i wytrzymałości.

2. Wpływ czasu wyżarzania na przebieg opisanych zmian objawia się najsilniej w temperaturze około 470°C; już nawet bardzo krótkie przebywanie próbek badanego stopu w pobliżu tej temperatury, podczas powolnego studzenia z temperatury przesycańca, wywołuje znaczny spadek udarności, wydłużenia i przewężenia.

3. Przebieg zmian własności mechanicznych badanego stopu pod wpływem temperatury i czasu wyżarzania pokrywa się w znacznym stopniu ze zmianami własności towarzyszących zjawisku kruchości - 475 stopów podwójnych Fe-Cr.

4. Kilkuminutowe wygrzewanie badanego stopu w temperaturze powyżej 560°C oraz następne oziębianie w wodzie powoduje prawie całkowity zanik opisanych zmian. Pozwala to na uzyskanie najkorzystniejszych własności plastycznych stopu H25J5, w związku z czym zabieg ten należy stosować przed kształtowaniem elementów grzejnych oraz przeróbką plastyczną na zimno.

LITERATURA

- [1] Houdremont E.: Handbuch der Sonderstahlkunde, Berlin - 1956 r. Springer Verlag.
- [2] Colombier L., Hochmann J.: Stale odporne na korozję i żaroodporne - tłumaczenie. Wydawnictwo "Śląsk" - Katowice 1964 r.
- [3] Bungardt K., Spyra W.: Arch. Eisenhüttenwesen - 27/1956 r. str. 777.

- [4] Pomey G., Bastain P.: Rev. Metall. - 53/1956, str. 147.
- [5] Pfeiffer H., Thomas H.: Zunderfeste Legierungen - Springer Verlag, 1963 r.
- [6] Schulze A.: Z. f. Metallkunde - 42/1951 r. str. 120.
- [7] Baerlecken E., Fabritius H.: Stahl u. Eisen - 75/1955 r. str. 1774.
- [8] Krivobok: Trans. A.S.M. - 1935 r. str. 1+56.
- [9] Beckett: Trans. A.J.M.M.E. - 1938 r. str. 15+36
- [10] Bandel G., Tofaute W.: Arch. Eisenhüttenwesen - 15/1941, str. 307+320.
- [11] Riedrich G., Loib F.: Arch. Eisenhüttenwesen , 15/1941, str. 175+182.
- [12] Houdremont E.: Arch. Eisenhüttenwesen - 21/1950, str. 413+422.
- [13] Lena J.A., Hawkes M.F.: J. Metals - 6/1954 r. str. 607+615.
- [14] Heger J.J.: J. Metals - 6/1954 r. str. 663.
- [15] R.M. Fisher, E.J. Dulis, Korroll K.G.: J. Metals - 6/1954, str.663+664.

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА ПРИ 350-550°С НА ХРУПКОСТЬ СПЛАВА
X 25 Ю 5

Резюме

Сплав Fe-Cr-Al содержащий 24,5% Cr и 4,8% Al подвергал при 350-550°С 2, 3, 5, 20, 30, 100, 200 и 300 часовому отжигу. Исполнено механические и металлографические исследования после отжига. Влияние температуры и времени на изменение механических свойств представлено на графиках.

EINFLUSS DER DAUERGLÜHUNG BEI 350 BIS 550°C
AUF DIE VERSPRÖDUNG EINER Fe-Cr-Al LEGIERUNG (Cr Al255)

Zusammenfassung

An Proben einer Fe-Cr-Al Legierung (mit 24,5% Cr u. 4,8% Al) wurden nach dem 2 bis 300-stündigen Glühen im Temperaturbereich 350 bis 550°C mechanische und mikroskopische Untersuchungen durchgeführt um den Einfluss der Wärmebehandlung auf die Versprödung der untersuchten Legierung zu bestimmen.

Der Zeit- und Temperatureinfluss auf die Veränderung der Zugfestigkeit, Dehnung, Einschnürung, Kerbschlagzähigkeit und Vickersharte wurde graphisch dargestellt.

Die Untersuchungen erwiesen eine weitgehende Ähnlichkeit der Versuchungsergebnisse mit den Veränderungen, welche bei der 475°C-Versprödung der Fe-Cr Legierungen auftreten.