

Jerzy Gierek
Adolf Maciejny

Instytut Inżynierii Materiałowej

ODDZIAŁYWANIE MODYFIKACJI I OBRÓBKIE CIEPLNEJ
NA STRUKTURĘ I WŁASNOŚCI STALIWA NIKLOWEGO
DO PRACY W TEMPERATURACH KRYOGENICZNYCH

Streszczenie. Zbadano wpływ mikrododatków stopowych jako modyfikatorów oraz obróbki cieplnej na własności mechaniczne i mechanizm pęknięcia w temperaturach kryogenicznych staliwa niklowego z zawartością 9% Ni. Dobrano optymalne modyfikatory i zabiegi cieplne zapewniające udarność powyżej 2 kGm/cm² do temperatury -200°C. Wykazano, że staliwo modyfikowane przy pomocy aluminium jak również manganu posiada najkorzystniejsze własności w niskich temperaturach dzięki drobnoziarnistej, jednorodnej strukturze, zapewniającej występowanie w temperaturach kryogenicznych przełomów transkryystalicznych z przewagą pęknięć ciągliwych.

1. Wstęp

Rozwój kryotechniki uwarunkowany jest opracowaniem nowych i tańszych tworzyw konstrukcyjnych, zachowujących wysokie własności wytrzymałościowe i plastyczne do temperatury ok. -200°C. Dotyczy to szczególnie tworzyw na urządzenia energetyczne oraz armaturę dla przemysłu chemicznego i metalurgicznego. Chodzi o duże elementy o złożonym kształcie pozwalające się najekonomiczniej kształtować przez odlewanie. Wiadomo jednak, że stopy przerobione plastycznie wykazują na ogół znacznie większą odporność na kruche pęknięcie w niskich temperaturach aniżeli stopy lane. Wyłania się zatem konieczność opracowania dla określonych stopów odlewniczych technologii wytwarzania i obróbki pozwalającej na zbliżenie ich struktury i własności w niskich temperaturach do odpowiadających im składem chemicznym stopów przerabianych plastycznie. Stanowiło to myśl przewodnią podjętej pracy.

O przydatności stopu żelaza do pracy w niskich temperaturach decyduje głównie jego skład chemiczny, jakość (czystość) uwarunkowana procesem metalurgicznym oraz struktura zależna zarówno od składu chemicznego jak i przyjętej technologii. Do niedawna podstawowym materiałem konstrukcyjnym dla techniki niskich temperatur były stale austenityczne. Obecnie coraz szersze zastosowanie zyskują niskowęglowe stale martenzytyczne o zawartości ok. 9% Ni, jako znacznie tańsze od stali austenitycznych i wykazujące wyższe własności wytrzymałościowe. Znaczący wpływ szybkości chłodzenia z temperatur austenitowania oraz odpuszczania na własności stali z zawartością 9% Ni stwarza jednak określone trudności technologiczne przy pro-

dukości elementów o dużych przekrojach. Dotyczy to szczególnie elementów lanych, gdzie przebieg przemian fazowych w procesach obróbki cieplnej jest dodatkowo determinowany rodzimą niejednorodnością i charakterem struktury pierwotnej odlewu.

Dotychczasowe badania staliw niklowych wykazały, że dla uzyskania wysokiej udarności w niskich temperaturach staliwo winno odznaczać się bardzo małą zawartością wodoru, co osiąga się przez odpowiednie prowadzenie procesu metalurgicznego oraz studzenie odlewów. Pożądana jest również mała zawartość wtrąceń tlenkowo-siarczkowych, co wymaga odtleniania stali przy pomocy aluminium oraz stosowania suchych form piaskowych [1].

Zjawisko podwyższonej udarności stali niklowych w temperaturach kryogenicznych przypisuje się obecności w strukturze szorstkowego względnie stabilnego austenitu. Wpływ tej fazy na własności omawianych stali nie został jednak dotąd w pełni wyjaśniony i istnieje w tym zakresie wiele sprzecznych poglądów [2-4].

Na podstawie przesłanek teoretycznych oraz dotychczasowych badań stali i staliw martenzytycznych z zawartością 9% Ni można postawić tezę, że uzyskanie odpowiednio wysokiej udarności staliwa 9% Ni w temperaturach kryogenicznych zależy nie tylko od obecności w strukturze austenitu, lecz również i to w decydującym stopniu od drobnoziarnistości i jednorodności struktury [5,6].

W stopach przerabianych plastycznie rozdrobnienie i ujednorodnienie struktury uzyskuje się przez dobór warunków przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej. Założono, że w stopach lanych podobny efekt winno zapewnić połączenie zabiegów modyfikowania i obróbki cieplnej. Dla udowodnienia tego przeprowadzono badania ujęte w niniejszej pracy, mające na celu określenie zmian strukturalnych staliwa 9% Ni wywołanych procesami modyfikowania i obróbki cieplnej oraz ich wpływu na własności mechaniczne i mechanizm złomu zarówno w temperaturze pokojowej jak i w temperaturach kryogenicznych.

2. Przebieg badań

Do badań użyto staliwo zawierające ok. 9% Ni i 0,13% C, dla którego jako modyfikatory dozowano następujące dodatki: Al, B, Ce, Mn, Mo, Pb, Si, Sn, Ti, V, Zn i Zr w ilościach: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 i 1,0%. Przygotowano w ten sposób do badań wstępnych 60 próbek staliwa.

Jako modyfikatory dobrano pierwiastki o intensywnym wpływie na drobnoziarnistość stopów żelaza, tworzące dyspersyjne wydzielenie faz międzymetalicznych jako zarodki krystalizacji oraz podwyższające hartowność już przy małych zawartościach.

Wytopy staliwa prowadzono w piecu indukcyjnym o pojemności tygla 50 kg i wyłożeniu kwaśnym. Stosowano wsad o dużym stopniu czystości składający

się z żelaza armco EO4 i niklu katodowego 99,99. W celu nawęglania wytopów stosowano rozdrobnione elektrody grafitowe oraz częściowo surówkę LH2. Proces odtleniania prowadzono przy użyciu żelazokrzemu 75% Fe-Si w ilości 0,40% ciężaru wsadu oraz metalicznego aluminium w ilości 0,18% w stosunku do ciężaru wsadu. Modyfikowanie prowadzono w tyglu pieca. Próbki staliwa zalewano do form skorupowych, a po ostygnięciu wybijano z form i oczyszczono. Dla każdego wytopu część próbek normalizowano z temperatury 1000°C po wygrzewaniu w czasie 3 godzin.

Całość badań przeprowadzono w następującej kolejności:

- badania wstępne: analiza chemiczna wytopów, badania metalograficzne i próby twardości,
- dobór optymalnych modyfikatorów i wykonanie II serii wytopów,
- badania przemian strukturalnych metodą dylatometryczną i mikroskopii wysokotemperaturowej,
- obróbka cieplna próbek,
- badania mechaniczne w temperaturach otoczenia i obniżonych,
- badania metalograficzne i fraktograficzne próbek poddanych badaniom mechanicznym.

3. Wyniki badań

Badania wstępne: Pierwsza faza badań serii 60 próbek miała na celu dobór optymalnych modyfikatorów niskowęglowego staliwa z zawartością 9% Ni. Na podstawie przesłanek teoretycznych oraz wyników dotychczasowych badań przyjęto, że dla zapewnienia odpowiednich własności wytrzymałościowych w obniżonych temperaturach oraz minimalnej udurowienia ok. 2 kgm/cm² przy -196°C, warunki modyfikowania oraz obróbki cieplnej staliwa winny zapewnić strukturę złożoną głównie z drobnoiglastego martenzytu z ewentualną zawartością austenitu szcążkowego oraz zmniejszenie do minimum zawartości w strukturze wolnego ferrytu.

Biorąc pod uwagę te kryteria stwierdzono, że zarówno w stanie nie obrabionym cieplnie jak i po następnym normalizowaniu najkorzystniejsza struktura złożona z drobnoiglastego martenzytu z pewną zawartością bainitu, bez wydzielenia ferrytu, wystąpiła w wytopach modyfikowanych przy pomocy aluminium i manganu w ilości do 0,5% oraz boru i cynku w ilości do 0,1%. Pierwiastki te wykazały największy wpływ na rozdrobnienie struktury i wzrost twardości. Zadecydowało to o przyjęciu tych dodatków jako modyfikatorów wytopów staliwa użytych w dalszych badaniach.

Rozdrobnienie struktury stwierdzono również modyfikując badane staliwo przy pomocy tytanu, wanadu, molibdenu i krzemu, jednakże przy równoczesnym zwiększeniu udziału w strukturze ferrytu i bainitu.

Z pozostałych badanych pierwiastków cer i cyrkon nie wywierały praktycznie wpływu zarówno na strukturę jak i na twardość. Natomiast wytopy staliwa modyfikowane cyną i ołowiem wykazały już przy małych dodatkach modyfikatora (0,05 i 0,1%) nadmierną segregację i wydzielenia po granicach ziarn, przez co wyeliminowano je z dalszych badań.

W wyniku przeprowadzonych wstępnych doświadczeń badania zasadnicze, objęte tematem pracy skoncentrowano na 5 wytopach staliwa o składzie chemicznym podanym w tablicy 1.

Tablica 1

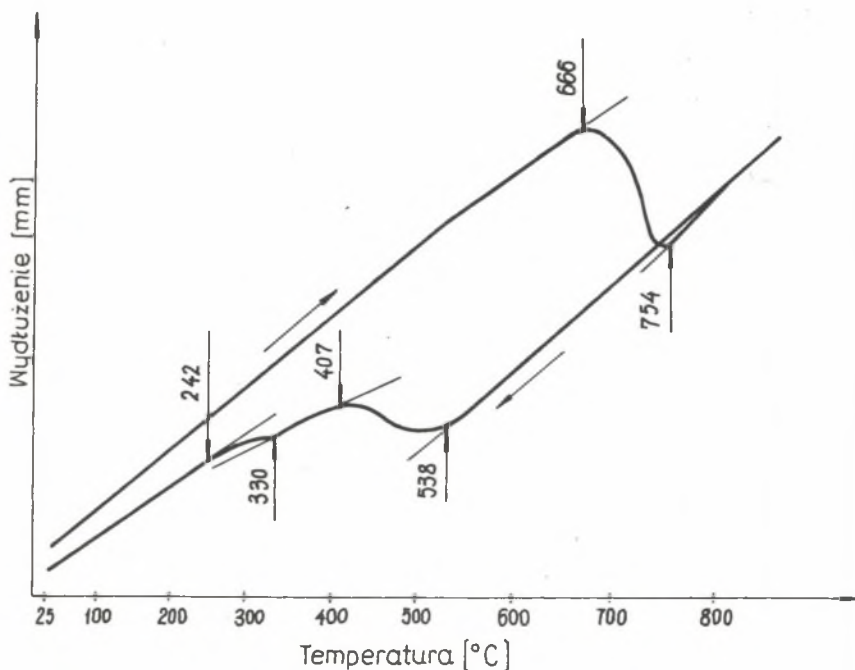
Wyniki analizy chemicznej badanych wytopów staliwa

Wytop	Skład chemiczny %								
	C	Ni	Si	P	S	Al	B	Mn	Zn
A	0,10	9,02	0,41	0,016	0,011	-	-	-	-
B	0,12	9,08	0,42	0,016	0,012	0,36	-	-	-
C	0,09	8,80	0,41	0,018	0,013	-	0,06	-	-
D	0,08	9,20	0,47	0,020	0,015	-	-	0,50	-
E	0,10	8,75	0,45	0,018	0,013	-	-	-	0,035

Badania dylatometryczne: Proces normalizowania staliwa 9% Ni jest w zasadzie hartowaniem na powietrzu stąd przy następnym nagrzewaniu stwierdza się zmiany objętości związane z procesem odpuszczania, a w szczególności przemianą austenitu szcążkowego w zakresie temperatur od ok. 330 do ok. 420°C. Przemiana ta nie wystąpiła w wytopie modyfikowanym Al (rys. 1), zaś w wytopie niemodyfikowanym oraz po modyfikacji Mn, B i Zn została słabo zaznaczona (rys. 2, 3, 4 i 5). Wskazują na to śladowe zawartości austenitu szcążkowego w badanym staliwie, a zarazem potwierdza się pośrednio słuszność przyjętej tezy, że nie obecność w strukturze austenitu, lecz inne czynniki jak np. drobnoziarnistość i jednorodność struktury będą mieć przypuszczalnie decydujący wpływ na własności badanego staliwa w obniżonych temperaturach.

Jak wynika z wykresów dylatometrycznych (rys. 1-5) przemiana alotropowa Ac_1 - z ewentualnym nałożeniem przemiany Ac_3 w wytopach zawierających wolny ferryt - rozciąga się na zakres od ok. 600 do 750°C. Przy chłodzeniu z obszaru austenitu w zakresie temperatur od ok. 565 do 370°C krzywe dylatometryczne zarejestrowały przemianę bainityczną, a w zakresie od ok. 360 do ok. 200°C - przemianę martenzytyczną. Porównując ilościowo efekty zmiany objętości towarzyszące tym dwóm przemianom można stwierdzić, że w wytopach modyfikowanych manganem przy chłodzeniu na powietrzu dominuje przemiana martenzytyczna, natomiast w wytopach modyfikowanych Al, B i Zn oraz w wytopie niemodyfikowanym - przemiana austenitu ma w większym stop-

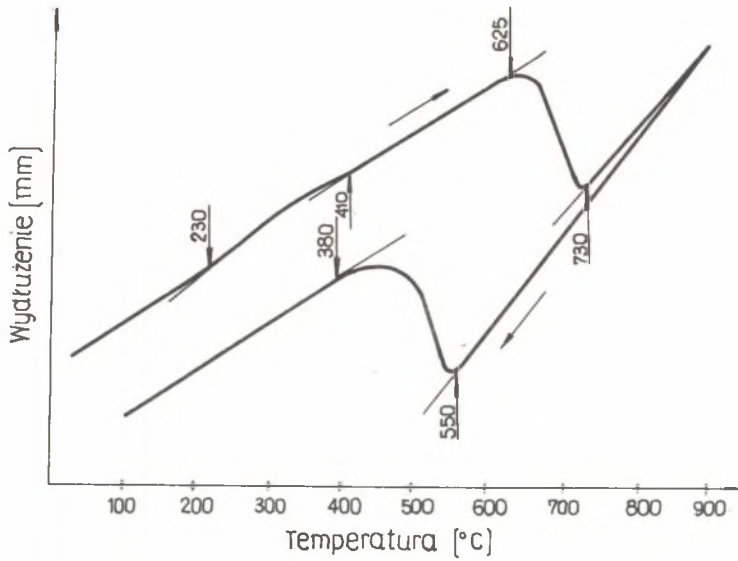
pnia charakter banityczny, aniżeli martenzytyczny. Jest to zgodne z wynikami obserwacji mikroskopowych.



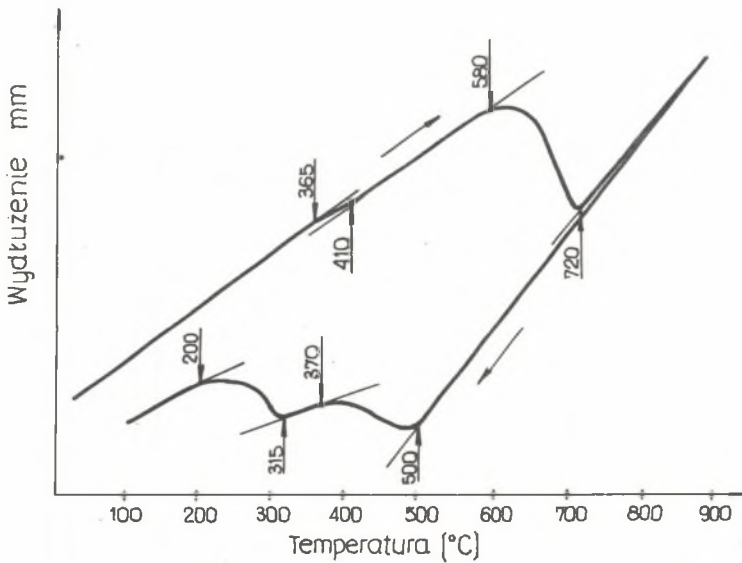
Rys. 1. Wykres dylatometryczny staliwa modyfikowanego 0,5% Al

Badania metalograficzne w podwyższonych temperaturach: Największe opóźnienie rozrostu ziarn ze wzrostem temperatury stwierdzono w staliwie modyfikowanym przy pomocy aluminium, w którym przy nagrzewaniu ciągłym do ok. 1000°C ziarno praktycznie nie zmienia wielkości (rys. 6 i 7), natomiast powyżej 1000°C stwierdza się już szybki rozrost ziarn (rys. 8 i 9). W przypadku staliwa modyfikowanego manganem rozrost ziarn ma charakter ciągły już od temperatury przemiany A_{c1} i ulega znacznemu umiędzywnieniu powyżej 950°C (rys. 10 - 12). Zaznacza się przy tym wyraźny wpływ wzrostu dodatku manganu jako modyfikatora od 0,2% do 1,0% na zmniejszenie intensywności rozrostu ziarn austenitu (rys. 13 i 14). W wytopach modyfikowanych borem i cynkiem wzrost ziarn jest determinowany procesami wydzielenia po granicach ziarn (rys. 15).

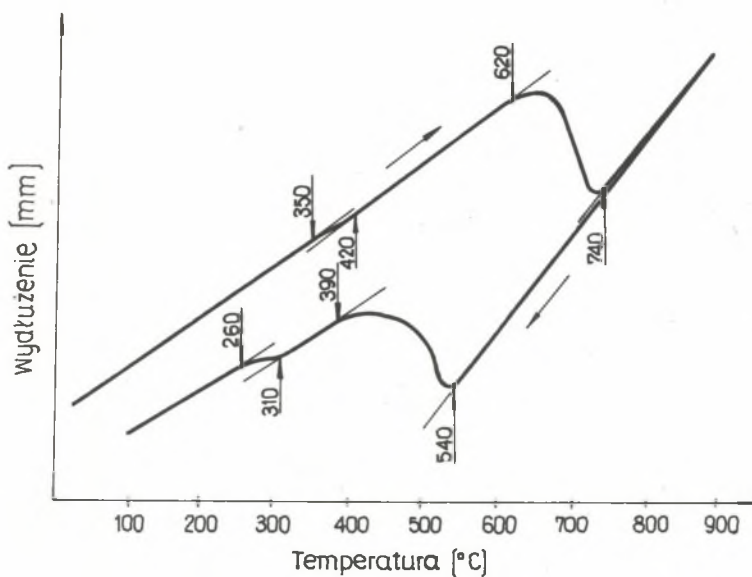
Biorąc pod uwagę, że temperatura końca przemiany A_{c1} nie przekracza na ogół 750°C (jak wynika z badań dylatometrycznych), zaś wyraźny wzrost ziarn następuje dopiero w zakresie temperatur 950÷1000°C, przyjęto, że temperatury austenitizowania badanego staliwa powinny się mieścić w zakresie temperatur od 750°C do 950°C.



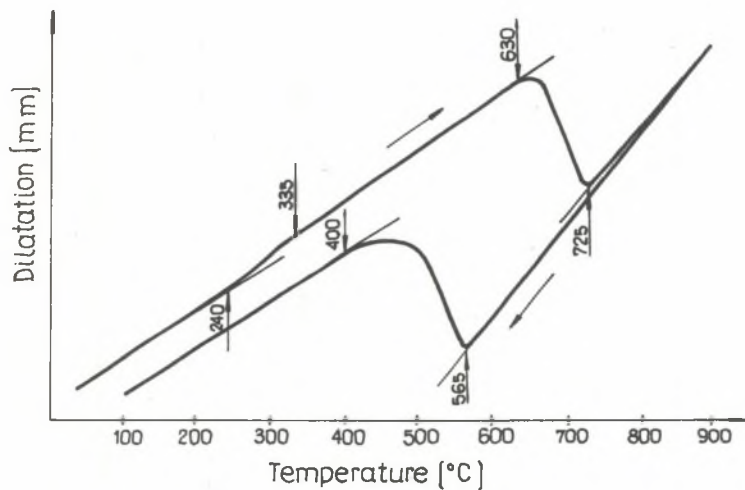
Rys. 2. Wykres dylatometryczny staliwa niemodyfikowanego



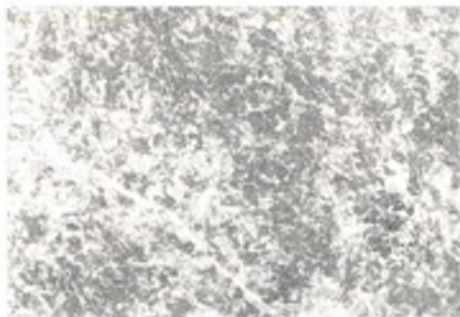
Rys. 3. Wykres dylatometryczny staliwa modyfikowanego 0,5% Mn



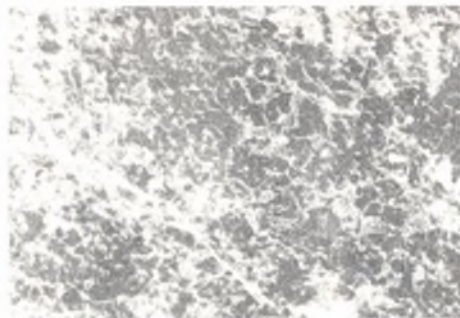
Rys. 4. Wykres dylatometryczny modyfikowany 0,5% B



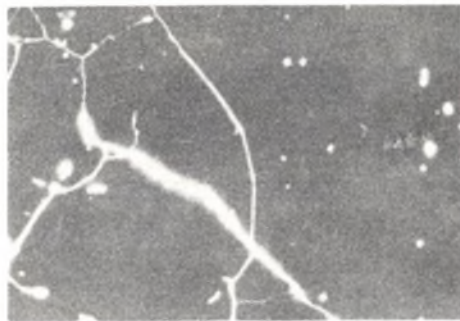
Rys. 5. Wykres dylatometryczny modyfikowany 0,1% Zn



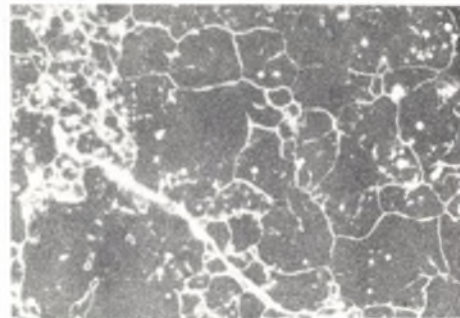
Rys. 6. Mikrostruktura staliwa modyfikowanego 0,6% Al obserwowana przy temperaturze 900°C po 15 min.; drobne, niejednorodne ziarna austenitu z widocznymi granicami ziarn pierwotnych 250x



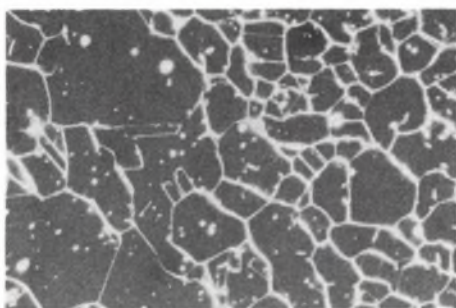
Rys. 7. Szczegóły struktury jak na rys. 6. obserwowany przy temperaturze 950°C po 15 min.; 250x



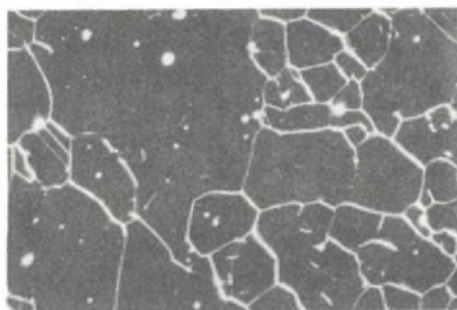
Rys. 9. Szczegóły struktury jak na rys. 6 - 8 obserwowany przy temperaturze 1100°C po 15 min., znaczny rozrost ziarn austenitu, 250x



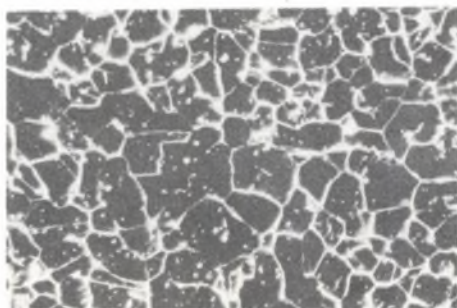
Rys. 8. Szczegóły struktury jak na rys. 6 i 7, obserwowany przy temperaturze 1000°C po 15 min., początek rozrostu ziarn austenitu, 250x



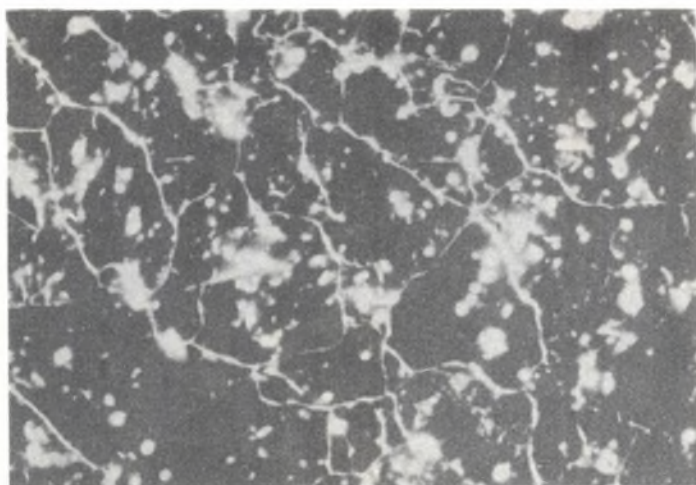
Rys. 10. Mikrostruktura staliwa modyfikowanego 0,2% Mn obserwowana przy temperaturze 850°C po 15 min.; początek wzrostu ziarn austenitu, 250x



Rys. 11. Szczegół struktury jak na rys. 10 obserwowany przy temperaturze 900°C po 15 min., 250x



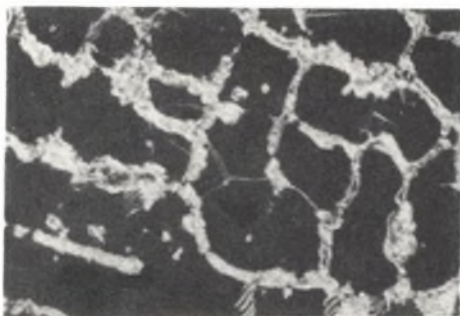
Rys. 12. Szczegół struktury jak na rys. 10 i 11 obserwowany przy temperaturze 950°C po 15 min., 250x



Rys. 13. Struktura staliwa modyfikowanego 1% Mn obserwowana przy temperaturze 850°C po 15 min.; bardzo drobne ziarno austenitu, 250x



Rys. 14. Szczegół struktury jak na rys. 13 obserwowany przy temperaturze 950°C po 15 min.; 250x



Rys. 15. Mikrostruktura staliwa modyfikowanego 0,5% B obserwowana przy 1000°C po 5 min.; siatka wydzielen na granicy ziarn austenitu, 250x

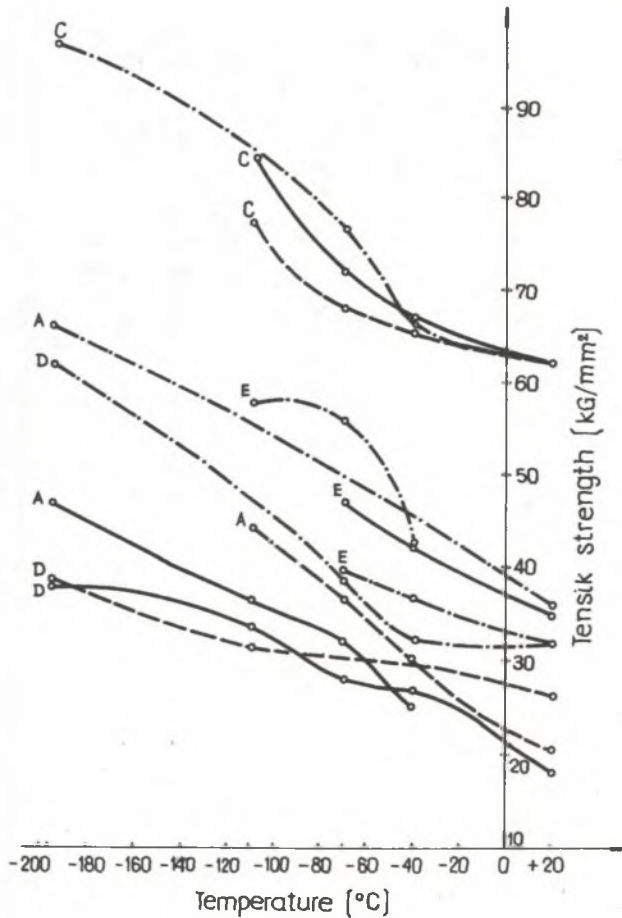
Z uwagi jednak na konieczność ujednorodnienia austenitu optymalny wydaje się być zakres temperatur austenitowania od 850 do 950°C, co przyjęto w niniejszej pracy.

Badania mechaniczne: Badania wytrzymałości i udarności w temperaturach otoczenia i obniżonych przeprowadzono na próbkach staliw zestawionych w tablicy 1, normalizowanych z temperatur od 750 do 950°C w przedziale od 50^o przy czasach austenitowania 1 i 2 godziny. Część próbek odpuszczano w temperaturach od 500 do 700°C stosując przedziały od 25^o i czasy wygrzewania 3,5 i 10 godzin.

Wpływ obniżenia temperatury na wytrzymałość i udarność próbek staliwa normalizowanych z 950°C/1h i odpuszczanych w 600, 650 i 700°C w czasie 3 godzin ujmują przykładowo rys. 16 i 17. Jak wynika z rys. 16 wytop modyfikowany Mn wykazuje wytrzymałość ok. 60 kg/mm² w temperaturze otoczenia i ok. 95 kg/mm² w temperaturze -196°C. Są to wartości średnio wyższe o 70% od uzyskanych w staliwie niemodyfikowanym oraz po modyfikacji borem i cynkiem jak również i aluminium (rys. 17). Korzystne własności staliwa modyfikowanego manganem należy tłumaczyć jego większą hartownością w porównaniu do pozostałych wytopów.

Najwyższe wartości udarności uzyskano w wytopach staliwa modyfikowanych przy pomocy aluminium i manganu. W wytopie modyfikowanym za pomocą aluminium w ilości 0,6% po obróbce cieplnej złożonej z normalizowania w 850°C/2h oraz odpuszczania w 650°C/10h, uzyskano w temperaturze otoczenia udarność ok. 10 kgm/cm² zaś w temperaturze -196°C ok. 2,5 kgm/cm².

Jak wynika z rys. 17, staliwo modyfikowane manganem w ilości 0,55% normalizowane z 950°C/1h i odpuszczane w 650°C/3h, wykazuje w temperaturze otoczenia udarność ok. 6 kgm/cm², a przy -110°C ok. 2 kgm/cm². Zastosowanie temperatur austenitowania poniżej 950°C zaznaczyło się spadkiem udarności, co należy tłumaczyć niewystarczającym ujednorodnieniem austenitu.

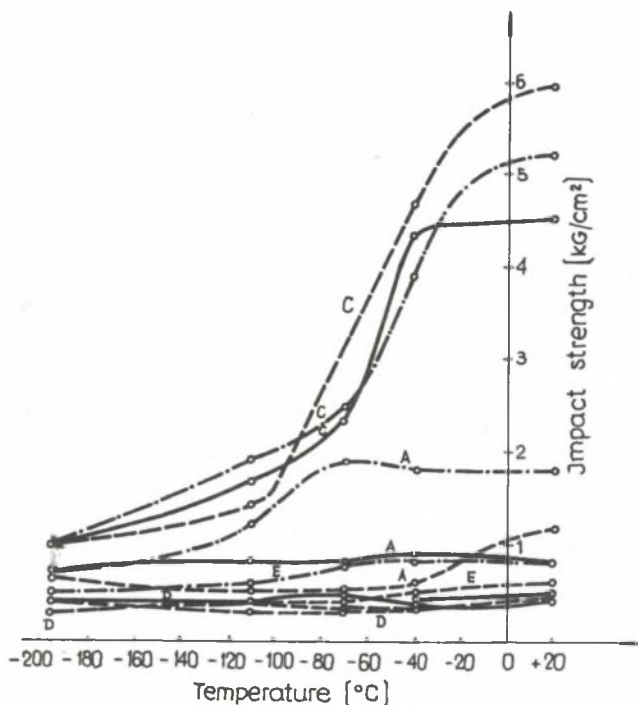


Rys. 16. Wpływ temperatury na wytrzymałość na rozciąganie badanych wytopów staliwa

Staliwo niemodyfikowane, normalizowane z $850^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ i odpuszczone w $500\text{--}600^{\circ}\text{C}/10\text{h}$ jak również normalizowane z $900^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ wykazało w temperaturze otoczenia udarność ok. $5\text{ kGm}/\text{om}^2$.

Z obniżeniem temperatury w staliwie tym zaznaczył się jednak nagły spadek udarności (rys. 17).

Badania wstępne wykazały znaczną drobnoziarnistość i dużą hartowność staliwa modyfikowanego borem i cynkiem. Zdecydowało to o przyjęciu tych staliw do dalszych badań. Wykazały one jednak bardzo niską udarność (poniżej $2\text{ kGm}/\text{om}^2$) zarówno w temperaturze otoczenia jak i w temperaturach obniżonych.

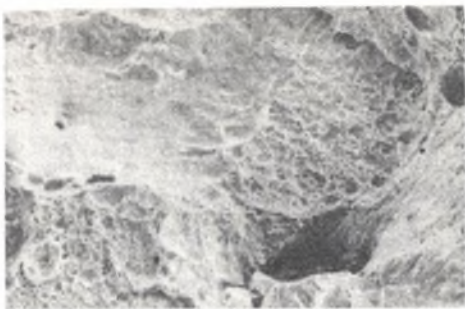


Rys. 17. Wpływ temperatury na udarność badanych wytopów staliwa

Badania fraktograficzne. Badania na mikroskopie skanningowym przełomów próbek udarnościowych pozwoliły określić czynniki strukturalne wpływające na zmiany udarności badanych staliw w temperaturach otoczenia i obniżonych.

Staliwo niemodyfikowane w stanie ulepszonym cieplnie wykazało w próbie udarności w temperaturze otoczenia przełomy mieszane, zawierające obok pęknięć ciągliwych pęknięcia transkryystaliczno-łupliwe (rys. 18). Z obniżeniem temperatury do -196°C wystąpiły typowe przełomy transkryystaliczne łupliwe bez śladów odkształcenia plastycznego powierzchni (rys. 19).

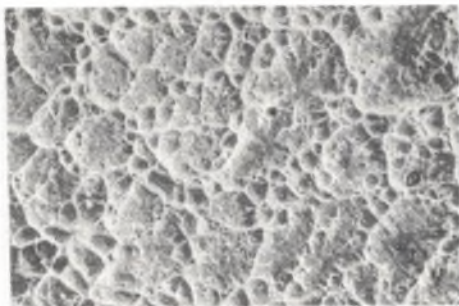
Staliwo modyfikowane aluminium odznaczające się po ulepszeniu cieplnym najwyższą udarnością z wszystkich badanych, wykazało w temperaturze otoczenia jak i obniżonych przełomy transkryystaliczne, w pełni ciągliwe charakterystyczne dla materiałów drobnoziarnistych (rys. 20). Podobne przełomy ujawniono w staliwie modyfikowanym manganem, po próbie udarności w temperaturach od -40°C (rys. 21). Z dalszym obniżeniem temperatury próby udarności zwiększa się na przełomie udział pęknięć transkryystalicznych łupliwych, a maleje udział pęknięć ciągliwych (rys. 22 i 23).



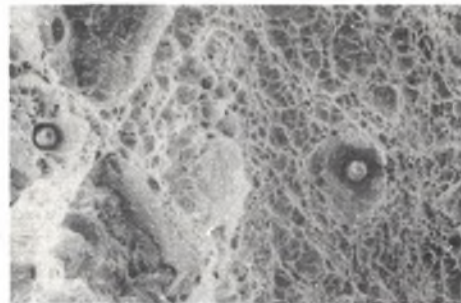
Rys. 18. Staliwo niemodyfikowane (wytop A), N 950°C/3h i 0.650°C/3h, $U_{20} \approx 5$ kGm/cm². Przełom mieszany - obok pęknięć ciągliwych widoczne pęknięcia transkryystaliczne łupliwe, 750x



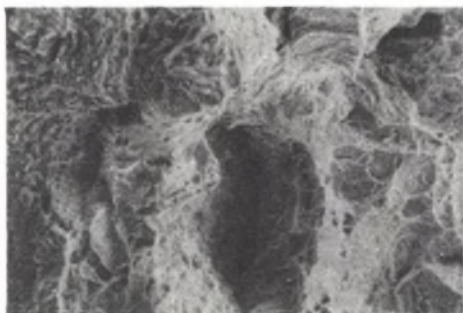
Rys. 19. Staliwo niemodyfikowane (wytop A), N 950°C/1h i 0.650°C/3h, $U_{196} \approx 1$ kGm/cm². Typowy przełom transkryystaliczny łupliwy bez śladów odkształcenia plastycznego powierzchni, 70x



Rys. 20. Staliwo modyfikowane aluminium (wytop B), N.850°C/2h i 0.600°C/10h, $U_{20} \approx 10$ kGm/cm². Przełom transkryystaliczny ciągliwy typowy dla struktur drobnoziarnistych o dużej jednorodności 750x



Rys. 21. Staliwo modyfikowane manganem (wytop D) N.950°C/1h i 0.650°C/3h, $U_{40} \approx 5$ kGm/cm². Przełom transkryystaliczny ciągliwy charakterystyczny dla struktur niejednorodnych, 750x



Rys. 22. Staliwo modyfikowane manganem (wytóp D), $N.950^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ i $0.650^{\circ}\text{C}/3\text{h}$
 $U_{-70} \approx 3,5 \text{ kGm/cm}^2$. Przełom transkryystaliczny z udziałem pęknięć ciągliwych i żupliwych, 750x



Rys. 23. Staliwo modyfikowane manganem (wytóp D) $N.950^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ i $0.650^{\circ}\text{C}/3\text{h}$,
 $U_{-196} \approx 1,2 \text{ kGm/cm}^2$. Przełom transkryystaliczny żupliwy ze śladami pęknięć ciągliwych i międzykryystalicznych, 200x



Rys. 24. Staliwo modyfikowane borem (wytóp C), $N.800^{\circ}\text{C}/2\text{h}$, $U_{20} \approx 1 \text{ kGm/cm}^2$
 Przełom międzykryystaliczny ze śladami wydzieleń po granicach ziarn oraz nieciągłościami na styku ziarn, 300x

W wytopach staliwa modyfikowanych borem i cynkiem niezależnie od temperatury badania wystąpiły przełomy z przewagą pęknięć międzykrystalicznych (rys. 24).

4. Wnioski

1. Prawidłowy dobór rodzaju i ilości modyfikatora oraz warunków obróbki cieplnej zapewnia w niskowęglowym staliwie z zawartością ok. 9% Ni znaczny wzrost udarności i własności wytrzymałościowych w niskich temperaturach.

2. Wpływ modyfikacji i obróbki cieplnej na podwyższenie udarności staliwa w badanym zakresie temperatur od -196°C do 20°C wiąże się z rozdrobnieniem ziarna austenitu i produktów jego przemiany, wzrostem hartowności tj. zwiększeniem udziału w strukturze martenzytu oraz większą jednorodnością struktury.

Nie stwierdzono oddziaływania na własności austenitu szocątkowego, gdyż zawartość w strukturze tej fazy była na granicy wykrywalności metodą rentgenograficzną.

3. Z badanych modyfikatorów najkorzystniejszy okazał się dodatek 0,6% aluminium zapewniający po odpowiedniej obróbce cieplnej udarność ok. 10 kgm/om^2 w temperaturze 20°C i 2,5 kgm/om^2 w temperaturze -196°C , jak również dodatek manganu w ilości 0,55%, zapewniający w temperaturze otoczenia udarność ok. 6 kgm/om^2 i ok. 2 kgm/om^2 w -110°C . Wytrzymałość staliwa modyfikowanego manganem wzrasta od ok. 60 kg/mm^2 w temperaturze otoczenia do ok. 95 kg/mm^2 w temperaturze -196°C .

4. Staliwo niemodyfikowane po odpowiedniej obróbce cieplnej wykazuje w temperaturze otoczenia udarność ok. 5 kgm/om^2 , jednak w porównaniu do wytopów modyfikowanych przy pomocy aluminium i manganu w temperaturach obniżonych następuje szybki spadek udarności tego staliwa poniżej 2 kgm/om^2 . Jest to wynikiem większego ziarna i bardziej niejednorodnej struktury, jako czynników ułatwiających zarodkowanie kruchoych pęknięć łupliwych oraz międzyziarnistych, co potwierdziły badania fraktograficzne.

5. Niskie własności mechaniczne staliw modyfikowanych borem i cynkiem są wynikiem znacznej podatności na pękanie międzyziarniste, co wiąże się z segregacją składników oraz wydzielaniem faz po granicach ziarn pierwotnego austenitu.

6. Dla uzyskania dużej jednorodności austenitu zapewniającej odpowiednią hartowność przy równoczesnym zachowaniu drobnoziarnistości struktury, temperaturę austenitowania badanego staliwa należy dobrać w zakresie od 850 do 950°C . Optymalną udarność uzyskuje się po odpuszczeniu w przedziale temperatur $550\text{--}650^{\circ}\text{C}$. W warunkach prowadzonych badań ustalono, że optymalną obróbką cieplną jest normalizowanie z $850^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ i ochłodzeniem

na powietrzu z następnym odpuszczeniem z 650°C/10h i ochłodzeniem na powietrzu. Warunki modyfikacji wywierają zasadniczo wpływ na parametry temperatury i czasu zabiegów cieplnych, zapewniających optymalne własności mechaniczne.

7. Badania metalograficzne i fraktograficzne wskazują na celowość zastosowania przed normalizowaniem wyżarzania ujednorodniającego, w celu uodpornienia staliwa na pękanie międzykrystaliczne.

8. Wydaje się celowym prowadzenie dalszych badań nad opracowaniem technologii wytwarzania i obróbki staliwa z zawartością 9% Ni przy uwzględnieniu jako modyfikatorów molibdenu, tytanu, wanadu i krzemu oraz modyfikatorów złożonych.

LITERATURA

- [1] Jackson W.J., Ridal E.J.: Journal BSCRA 1961 v. 58, str. 39,
- [2] Hardwick D.: The Iron and Steel Institute, 1964, Spec. Report 86.
- [3] Nutting J.: Hutnik, 1969, nr 12, str. 623.
- [4] Brophy G.R., Miller A.J.: Trans. ASM, 1949, v. 41, str. 1185.
- [5] Kron M. i współautorzy: Proc. ASTM, 1951, v. 51, str. 901.
- [6] Gierek J.: Rozprawa doktorska, Wydz. Metalurgiczny Politechniki Śląskiej, Katowice 1972.
- [7] Gierek J., Maciejny A.: Prace III Ogólnopolskiej Konferencji Mikroskopii Elektronowej Ciała Stałego, Komitet Hutnictwa PAN i SITPH, Kraków-Bartkowa 1973, str. 230.

ВОЗДЕЙСТВИЕ МОДИФИКАЦИИ И ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВО-ЛИТОЙ СТАЛИ К РАБОТЕ В НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Р е з ю м е

Исследовано влияние легированных микропримесей в качестве модификаторов а также термообработки на механические свойства и механизм растрескивания в низких температурах никелево-литой стали с содержанием 9%. Подобрано оптимальные модификаторы и термоприемы обеспечивающие ударную вязкость свыше 2 кг/мм² до температуры -200°C. Установлено, что литая сталь модифицирована с помощью алюминия и марганца содержит самые благоприятные свойства в низких температурах. Благодаря мелкозернистой однородной структуре обеспечивающей нахождение транскристаллических переломов с пересечением тягучих тресканий в низких температурах.

THE INFLUENCE OF MODIFICATION AND HEAT TREATMENT
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NICKEL CAST
STEEL FOR WORK IN CRYOGENIC TEMPERATURES

S u m m a r y

The influence of micro-alloy additions as modifiers and heat treatment on mechanical properties and fracture mechanism of nickel cast steel (9% Ni content) in cryogenic temperatures has been studied. The most profitable modifiers and heat treatment conditions that ensure impact strength above 2 kGm/cm^2 up to temperatures -200°C were selected. The authors showed that cast steel modified by use of aluminium as well as of manganese possesses the most profitable mechanical properties in low temperatures thanks to fine-grained homogenous microstructures which make it possible for transcrystalline fracture with predominance of ductile fracture to appear in cryogenic temperatures.