

Stanisław LALIK, Zbigniew MATERKA

Instytut Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska

PROBLEMY SPAWALNOŚCI NOWYCH STALI
TYPU FERMANAL I FERCHROMAN

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań skłonności stali 60G30J9 i 50H17G17 do tworzenia pęknięć gorących w procesie spawania, a w szczególności określono temperaturowy zakres kruchości TZK oraz wartości odkształcenia krytycznego i dopuszczalnej grubości odkształcenia w TZK. Przedstawiono także wyniki badań własności mechanicznych i struktury połączeń spawanych wykonanych wiązką elektronów, metodą TIG oraz ręcznie elektrodą ES-18-8-6B.

1. WSTĘP

Prowadzone w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej prace nad wysokostopowymi manganowymi stalami austenitycznymi pozwoliły na opracowanie nowych stali typu FERMANAL i FERCHROMAN, które oznaczono odpowiednio 60G30J9 i 50H17G17. Stale te charakteryzują się wysokimi własnościami mechanicznymi (R_m około 960 MPa) oraz szeregiem interesujących własności technologicznych, z których charakterystyczne są przydatność do pracy w temperaturach kriogenicznych oraz dla stali FERMANAL obniżony o około 12% w stosunku do stali konstrukcyjnych ciężar właściwy przy wysokiej plastyczności (A_5 około 30%) i dla stali FERCHROMAN dobra żaroodporność oraz odporność na kawitacyjne oddziaływanie ośrodka [1,2,3,4].

Przydatność tych stali do celów konstrukcyjnych uwarunkowana jest w dużym stopniu możliwością ich spawania, dlatego konieczne jest określenie spawalności tych stali. W związku ze skłonnością stali austenitycznych do pęknięcia gorącego, badania spawalności przeprowadzono w kierunku określenia ich skłonności do tworzenia tego rodzaju pęknięć w trakcie procesu spawania oraz określenia własności mechanicznych i struktury złączy spawanych elektrodami otulonymi, elektrodą wolframową w osłonie argonu oraz wiązką elektronów.

2. BADANIA WŁASNE

2.1. Materiał do badań

Badania przeprowadzono na płytach wyciętych z gorąco walcowanych blach o grubości 4 mm. Płyty próbne spawano przy użyciu elektrod ES 18-8-6B, drutu SP13 oraz pasków blachy wyciętych z analizowanych stali. Skład chemiczny badanych stali oraz materiałów dodatkowych do spawania podano w tabeli 1.

Tabela 1

Skład chemiczny materiałów użytych do badań

Materiał	C	Mn	Al	Cr	Ni	Si	P	S
60G30J9	0,60	29,7	8,75	-	-	0,4	0,02	0,02
50H17G17	0,50	17,8	-	16,6	0,22	0,7	0,35	0,001
ES 18-8-6B	0,18	5-8	-	17-21	7-10	maks. 1,5	maks. 0,04	maks. 0,025
SP13	0,06	1-2	-	18-20	10-12	0,6	maks. 0,015	maks. 0,018

2.2. Badania odporności stali na pęknięcia gorące

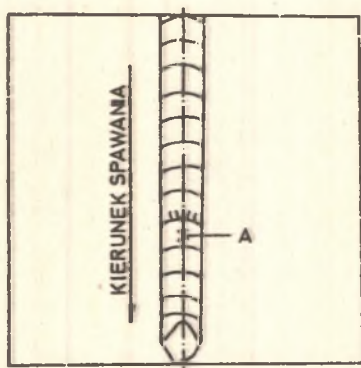
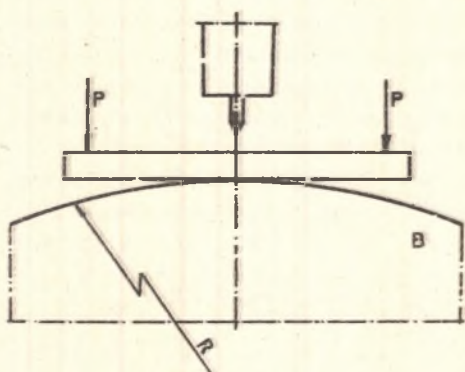
Badania odporności analizowanych stali na pęknięcia gorące przeprowadzono stosując próbę o zmiennej wielkości odkształcenia Trans-Varestraint [5].

Na podstawie badań określono zależność ilości oraz długości powstających pęknięć w zależności od wielkości odkształcenia i prądu spawania, a także temperaturowy zakres kruchości TZK, wartość odkształcenia krytycznego w TZK CST (Critical Strain for Temperature drop) i dopuszczalną szybkość odkształcania w TZK CSS (Critical Strain Rate to time required to cause cracking). Badania przeprowadzono na płytkach o wymiarach 100x80 mm przez natapianie ich powierzchni metodą TIG energią liniową łuku wynoszącą $5,4 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}}$ ($J = 150 \text{ A}$, $U = 12 \text{ V}$, $v = 12 \frac{\text{m}}{\text{godz.}}$).

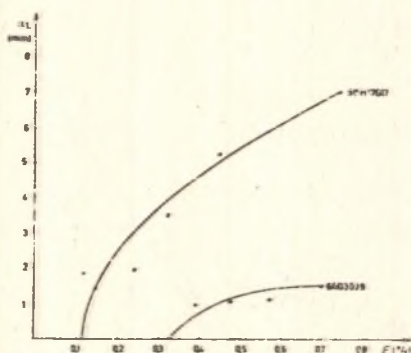
W czasie natapiania do płytki (rys. 1) przykładano dynamiczną siłę zginającą P, która odkształcała płytkę w stopniu zależnym od krzywizny wymiennych bloków B. Stopień odkształcenia zmniejszano aż do zaniku pęknięć na gorąco. Odkształcenie próbki powodowało w obszarze tuż za jeziorkiem spawalniczym, znajdującym się w przedziale temperatur obejmujących temperaturowy zakres kruchości, powstawanie pęknięć. Obszar przetopionego materiału poddawano badaniom penetracyjnym w celu identyfikacji pęknięć.

Oceny skłonności badanych stali do pęknięcia gorącego dokonano przyjmując jako kryterium stosunek sumy długości pęknięć do wielkości odkształcenia oraz wielkością TZK, a także wartościami CST i CSS, które jak wynika z danych literaturowy [5] - zależą jedynie od składu chemicznego

stopiwa. Rosnące wartości wskaźników CST i CSS wskazują o rosnącej odporności metalu na pęknięcie gorące.

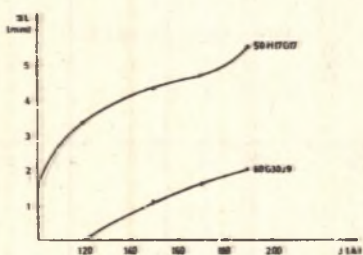


Rys. 1. Schemat przebiegu próby Trans-Varestraint



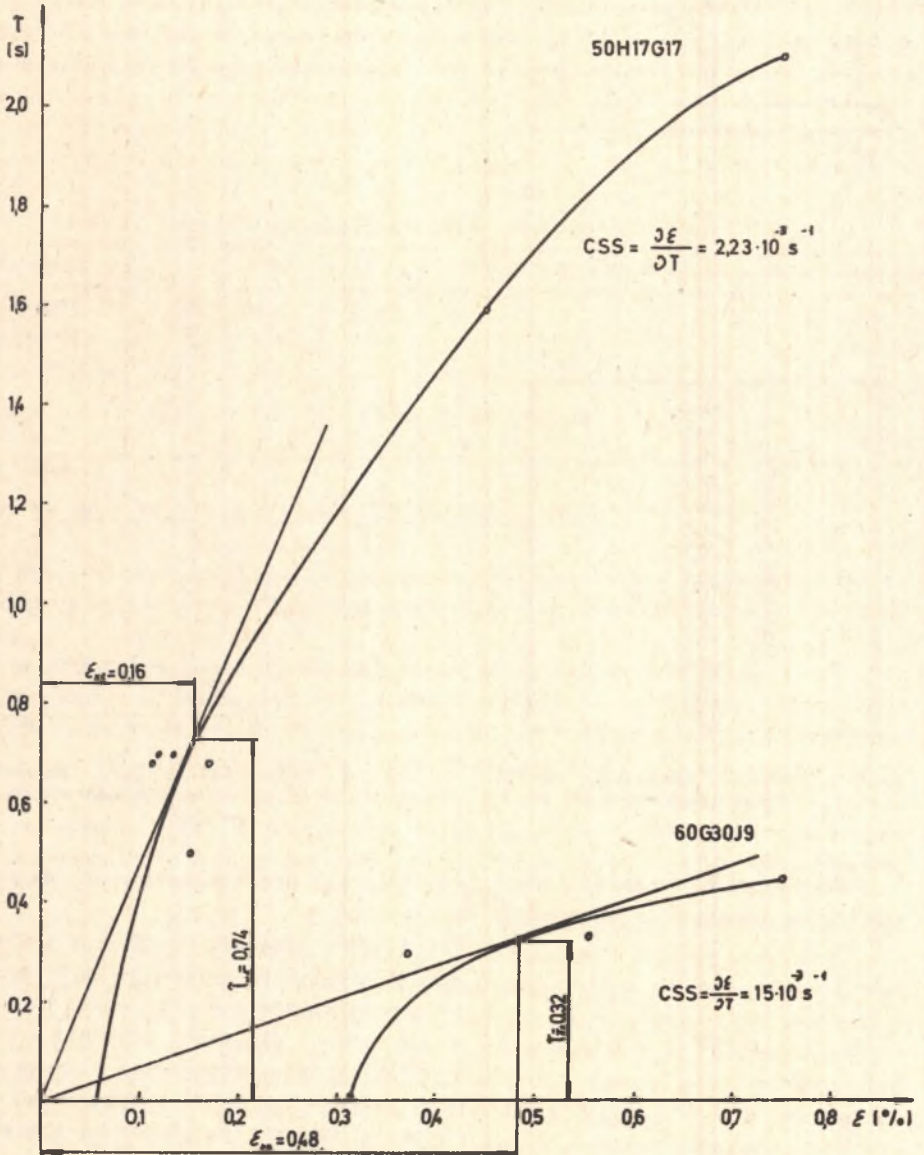
Rys. 2. Zależność ogólnej długości pęknięć Σl , od wielkości odkształcenia ξ

Wpływ wielkości odkształcenia oraz wartości prądu spawania na długość pęknięcia gorącego przedstawiono na rys. 2 i 3.



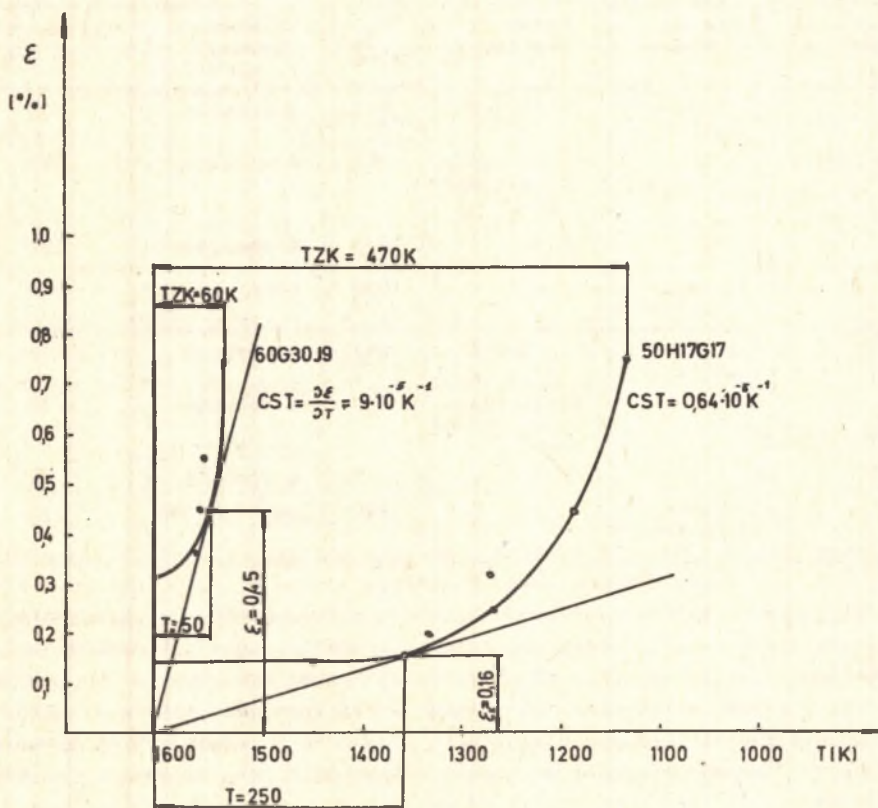
Rys. 3. Zależność ogólnej długości pęknięć od wielkości prądu spawania

Wpływ prądu spawania na długość powstających pęknięć określono stosując następujące odkształcenia: dla stali 60G30J9 - $\xi = 0,56\%$ i dla stali 50H17G17 - $\xi = 0,15\%$. W celu wyznaczenia temperaturowego zakresu kruchości rejestrowano cykl cieplny, jakiemu był poddawany krzepnący metal badanej stali w osi napoiny. Znając wielkość odkształceń i czas potrzebny do wytworzenia pęknięć o określonej długości, wyznaczono przebieg zmian



Rys. 4. Przebieg zmian plastyczności w funkcji czasu

odkształcenia krzepnącego metalu w funkcji czasu (rys. 4). Znajomość tej zależności umożliwiła wyznaczenie pierwszego wskaźnika oceny skłonności stali do gorącego pęknięcia CSS. Wskaźnik CSS określony jest jako tangens kąta zawartego między styczną do krzywej plastyczności i osią czasu. Temperaturę końca powstającego pęknięcia wyznaczono wykreślnie na krzywej cyklu cieplnego, odcinając na osi czasu od temperatury krzepnięcia jeziorzka czas potrzebny na przemieszczenie łuku o odcinek równy długości powstałego pęknięcia. Znajomość tej temperatury i odpowiadającym tym pęknięciom odkształceń pozwoliła na wyznaczenie przebiegu zmian plastyczności w funkcji temperatury (rys. 5) a na tej podstawie określono wartość odkształcenia krytycznego CST.



Rys. 5. Przebieg zmian plastyczności w funkcji temperatury

2.3. Badanie własności mechanicznych złączy spawanych

W celu określenia własności mechanicznych złączy spawanych wykonano płyty próbne elektrodą otuloną, metodą TIG oraz wiązką elektronów. Metodą TIG oraz elektrodą ES 18-8-6B wykonano złącza dwustronne na styk, a wiązką elek-

tronów - jednostronnie na styk. Złącza wykonywane elektrodą ES 18-8-6B spawano elektrodami o średnicy $\phi = 3,25$ mm przy następujących, zbliżonych dla obydwu stali parametrach: $J = 100$ A, $U = 30$ V. Metodą TIG spawano przy następujących parametrach $J = 100 - 120$ A, $V_{sp} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$, przy przepływie Ar = $15 \frac{1}{\text{min}}$, a przy spawaniu wiązką elektronów $U = 30$ kV, $J = 30$ mA, $V_{sp} = 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Wykonane złącza poddano statycznej próbie rozciągania i statycznej próbie zginania zgodnie z PN 64/M-69710 i PN 64/M-69720. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki badań mechanicznych złączy spawanych

Materiał spawany	Metoda spawania	Materiał dodatkowy	$R_{m, \text{sr}}$ [MPa]	Miejsce zerwania	Kąt zgięcia α [°]
60G30J9	elektrodą otuloną	ES 18-8-6B	793	w spoinie	105
	TIG	paski materiału rodzimego	904	w spoinie	117
		SP13	877	w spoinie	121
	wiązką elektronów	-	1036	poza spoiną	140
50H17G17	elektrodą otuloną	ES-18-8-6B	857	w spoinie	126
	TIG	paski materiału rodzimego	899	w spoinie	87
		SP13	812	w spoinie	92
	wiązką elektronów	-	1120	poza spoiną	45

Uzyskane wyniki wykazały, że najwyższą wytrzymałość na rozciąganie, zbliżoną do wytrzymałości badanych stali, posiadają złącza wykonane wiązką elektronów. Złącza wykonane elektrodami otulonymi oraz metodą TIG posiadały wytrzymałość na rozciąganie wyższą od wytrzymałości stopów użytych do wykonania złączy. Plastyczność złączy mierzona kątem zgięcia była ograniczona, przy czym najniższą plastyczność posiadały złącza wykonane ze stali 50H17G17.

W celu poprawienia własności plastycznych złącza próbne poddano obróbce cieplnej polegającej na wygrzaniu złączy spawanych w temperaturach dla stali 50H17G17 - 1420 K, a dla stali 60G30J9 - 1320K przez 20 minut i następnie przesycaaniu w wodzie. Złącza po obróbce cieplnej poddano statycznej próbie rozciągania i zginania, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tablica 3

Wyniki badań mechanicznych złączy spawanych, obrobionych cieplnie

Materiał spawany	Metoda spawania	Materiał dodatkowy	R _m _{gr} [MPa]	Miejsce zerwania	Kąt zgięcia α [°]
60G30J9	elektrodą otuloną	ES 18-8-6B	646	w spoinie	180
		paski materiału rodzimego	889	w spoinie	180
	TIG	SP13	841	w spoinie	180
	wiązka elektronów	-	962	w spoinie	180
50H17G17	elektrodą otuloną	ES 18-8-6R	829	w spoinie	180
		paski materiału rodzimego	886	w spoinie	180
	TIG	SP13	783	w spoinie	180
	wiązka elektronów	-	990	w spoinie	180

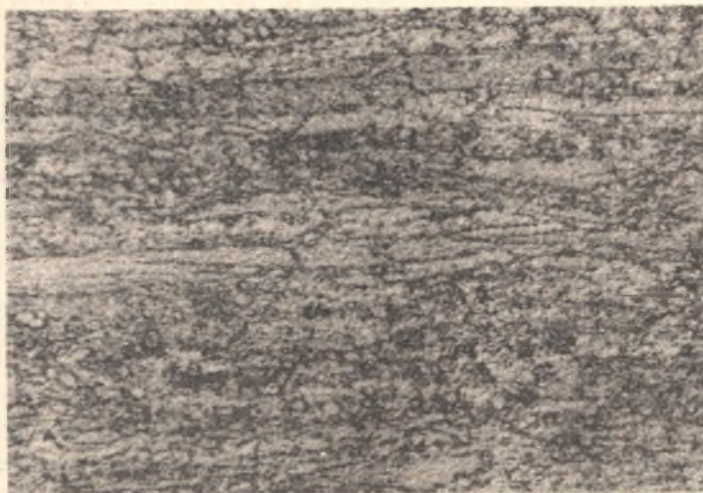
Otrzymane wyniki wykazały, że przesycenie zapewnia otrzymanie złączy spawanych o wysokiej plastyczności, wyrażonej kątem zgięcia wynoszącym 180° przy niewielkim spadku wytrzymałości na rozciąganie.

2.4. Badania metalograficzne

Obserwacje metalograficzne przeprowadzono na próbkach złączy spawanych, wyciętych z płyt próbnych oraz na próbkach otrzymanych podczas badań skłonności stali do pęknięcia gorącego. Wybrane struktury złączy przedstawiono na rys. 6-13. W stanie wyjściowym stal 60G30J9 posiadała strukturę austenityczną z pasmowymi ziarnami ferrytu (rys. 6), a stal 50H17G17 silnie zdefektowaną strukturę austenityczną z wydzieleniami węglików chromu typu $M_{23}C_6$ (rys. 7). Złącza wykonane wiązką elektronów (rys. 8) charakteryzowały się wąską strefą wpływu ciepła (rys. 9), przy czym w złączu ze stali 60G30J9 wystąpiła wyraźna granica wtopienia (rys. 10). W strefie wpływu ciepła złączy wykonanych metodą TIG oraz elektrodami otulonymi nastąpił zanik pasmowości struktury, a dodatkowo w złączach ze stali 60G30J9 nastąpił wzrost ilości oraz rozdrobnienie ziarn ferrytu (rys. 11). Obserwacje nie ujawniły wad wewnętrznych w analizowanych złączach. Charakter przebiegu pęknięć na gorąco powstałych w czasie próby Trans-Varestraint przedstawiono na rys. 12 i 13.



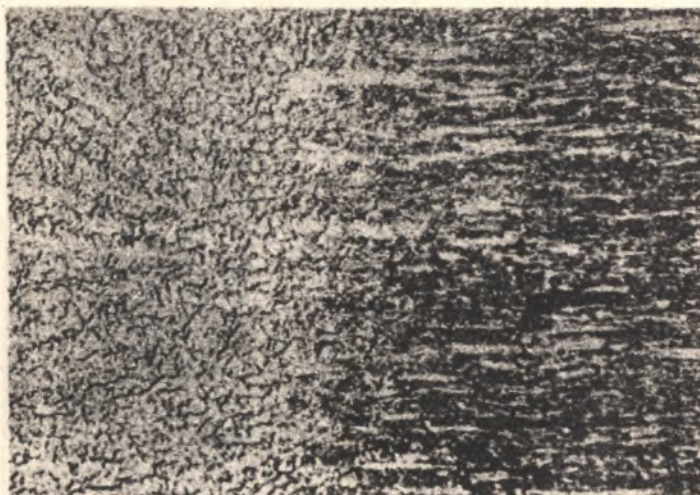
Rys. 6. Mikrostruktura stali 60G30J9. Pow. 250x



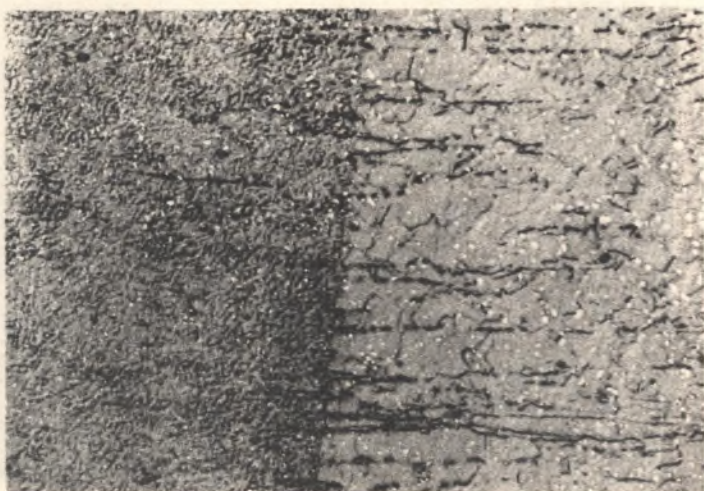
Rys. 7. Mikrostruktura stali 50H17G17. Pow. 400x



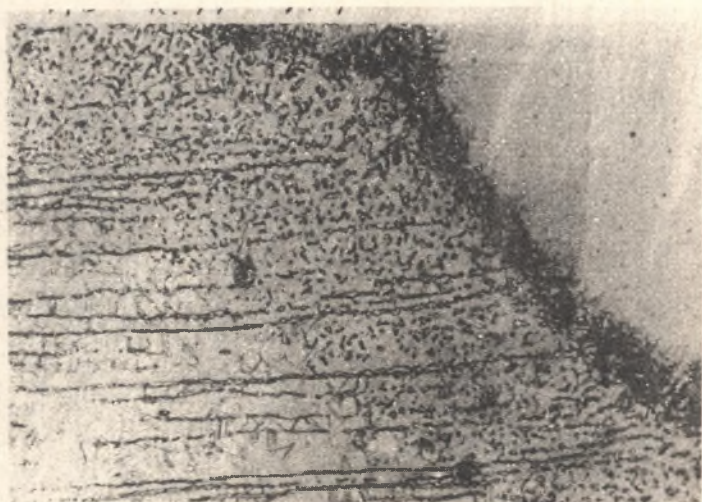
Rys. 8. Makrostruktura złącza spawanego wiązką elektronów ze stali 50H17G17



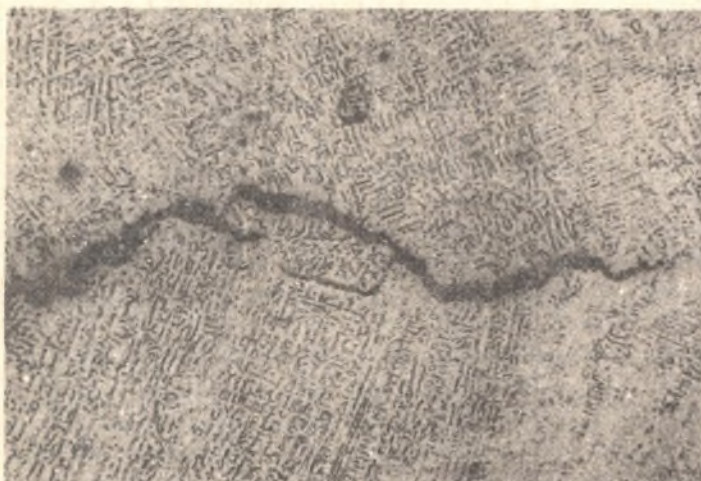
Rys. 9. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza ze stali 50H17G17, wykonanego wiązką elektronów. Pow. 100x



Rys. 10. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza ze stali 60G30J9, wykonanego wiązką elektronów. Pow. 100x



Rys. 11. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza ze stali 60G30J9, wykonanego elektrodą ES 18-8-6B. Pow. 100x



Rys. 12. Mikrostruktura pęknięcia gorącego powstałego w stali 60G30J9.
Pow. 100x



Rys. 13. Mikrostruktura pęknięcia gorącego powstałego w stali 50H17G17.
Pow. 70x

3. ANALIZA WYNIKÓW

Przeprowadzone badania wykazały zróżnicowaną skłonność analizowanych stali do pękania gorącego. Stal 60G30J9 wykazuje małą skłonność do pękania gorącego w procesie spawania. Pęknięcia pojawiają się przy odkształceniach powyżej 0,37%. Stal ta cechuje się wąskim zakresem kruchości wysokotemperaturowej, nie przekraczającym 60 K oraz stosunkowo wysokimi wartościami wskaźników $CST = 9 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ i $CSS = 15 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ (rys. 4,5), potwierdzającymi małą skłonność do pękania gorącego.

Stal 60H17G17 charakteryzuje się stosunkowo wysoką skłonnością do pękania gorącego, wyższą od stali typu 18-8. Zakres kruchości wysokotemperaturowej jest znacznie wyższy niż dla stali 60G30J9 i wynosi 470 K, natomiast wartości wskaźników CSS i CST są niskie i wynoszą odpowiednio $2,23 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ i $0,64 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

Badania własności mechanicznych złączy spawanych wykazały, że najwyższą wytrzymałość na rozciąganie posiadają złącza wykonane wiązką elektronów. Plastyczność złączy jest ograniczona i można ją podnieść, poddając elementy spawane obróbce cieplnej, polegającej na przesyconiu obszaru złącza.

Badania metalograficzne wykazały brak wad wewnętrznych i niewielkie zmiany struktury w strefie wpływu ciepła, polegające na rozroście ziarn i zaniku pasmowości struktury oraz wzroście ilości fazy ferrytycznej w złączach ze stali 60G30J9. Spoiny wszystkich złączy miały strukturę dendrytyczną. Obserwacje metalograficzne powstałych w czasie badań pęknięć gorących wykazały, że mają one charakter międzidendrytyczny, a ich ilość i długość jest większa w stali 50H17G17.

4. WNIOSKI

1. Stal 60G30J9 posiada niską skłonność do tworzenia pęknięć gorących w procesie spawania.
2. Stal 50H17G17 posiada znaczną skłonność do pękania gorącego, wzrastającą ze wzrostem energii liniowej łuku.
3. Najwyższe własności wytrzymałościowe posiadają złącza spawane przy zastosowaniu jako spoiwa materiału rodzimego.
4. Plastyczność złączy spawanych podwyższyć można przez zastosowanie obróbki cieplnej, polegającej na przesyconiu złączy z temperatury 1320 K dla stali 60G30J9 i z 1420 K dla stali 50H17G17.

LITERATURA

- [1] Woźniak H. i inni: Przemiany fazowe w stali typu FERMANAL i próba interpretacji mechanizmów umocnienia. Sprawozdanie z badań w ramach problemu I-22. Katowice 1977 (niepublikowane).

- [2] Gierek A., Woźnica H., Mazan J.: Wysokostopowa manganowo-aluminiowa stal typu FERMANAL - próby wdrożenia oraz podstawowe własności mechaniczne. Hutnik nr 2, 1978.
- [3] Maciejny A. i inni: Opracowanie nowych stali Cr-Mn. Sprawozdanie z badań w ramach problemu I-22. Katowice 1976 (niepublikowane).
- [4] Maciejny A., Hetmańczyk M., Niewielski G.: Mechaniczne i fizykochemiczne własności stali austenitycznej 17Cr-17Mn. Zbiór artykułów z międzynarodowego sympozjum nt. Materiały o wysokich własnościach fizyczno-mechanicznych. Bratysława 1977.
- [5] Senda T., Matsuda F.: Fundamental Investigations on Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Trans-Varestraint Test. Transaction of Japan Welding Society nr 2, 1971.
- [6] Gierek A., Woźnica H., Lalik St.: Badania spawalności nowej wysokostopowej manganowo-aluminiowej stali typu FERMANAL. Przegląd Spawalnictwa Nr 12, 1977.
- [7] Lalik St., Mazan J.: Badania spawalności chromowo-manganowej stali austenitycznej 50H17G17. Przegląd Spawalnictwa Nr 7, 1978.
- [8] Audo S., Kimata N.: Niektóre problemy swarki wysoko-manganowistych stali (tłum. 904/Wz) wg Kikaj no kenkju nr 2, 1974.
- [9] Barysznikow A., Pietrow G.: Stożkost' austenitnego marganciewo-aluminiowego metala szwa protiv obrazowanija goriaczych trieszozin. Awtom. Swarka nr 11, 1967.
- [10] Klimpel A., Mazur W., Szymański A.: Spawalność blach z nowych stali kwasoodpornych. Przegląd Spawalnictwa nr 7-8, 1975.

ПРОБЛЕМЫ СВАРИВАЕМОСТИ НОВЫХ СТАЛЕЙ
ТИПА "ФЕРМАНАЛЬ" И "ФЕРШРОМАН"

Р е з ю м е

В работе представлены результаты исследований склонности сталей 60G30JG и 50H17GJ7 к образованию горячих трещин в процессе сварки, в частности определены температурные пределы хрупкости TZK а также размеры критической деформации и допустимой скорости деформации в TZK. Представлены также результаты исследований механических свойств и структуры швов, выполненных пучком электронов методом TJC и ручным способом электродом ES-18-8-6B.

THE PROBLEMS OF WELDING NEW STEELS TYPE FERMANAL
AND FERCHROMAN

S u m m a r y

The paper presents the results of research on the tendency of 60G30J9 and 50H17G17 steels to hot cracking during welding, and particularly determines the temperature sphere (scope) of embrittlement TZK, and the of oritical strain and the allowable rate of strain in TZK. The

results of research on mechanical properties and on the structure of welded connections performed by means of the electron beam, by means of the TIG method, and manually, by means of ES-18-8-6B electrode are presented.