



URZĄD
PATENTOWY
PRL

Patent dodatkowy
do patentu nr

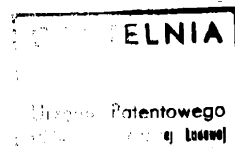
Zgłoszono: 29.09.78 (P. 209947)

Pierwszeństwo: 29.09.77 dla zastrz. 1-6
09.01.78 dla zastrz. 7-11
Stany Zjednoczone Ameryki

Zgłoszenie ogłoszono: 21.05.79

Opis patentowy opublikowano: 31.10.1983

Int. Cl.³ C22C 38/34
C21D 1/78
H01F 1/04



Twórca wynalazku: Howard Charles Fiedler

Uprawniony z patentu: General Electric Company,
Schenectady (Stany Zjednoczone Ameryki)

Sposób wytwarzania stali krzemowej o teksturze Gossa

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania stali krzemowej o teksturze Gossa.

Stale krzemowe stosowane w elektrotechnice zawierają wagowo od 2,2% do 4,5% krzemu, domieszki innych pierwiastków oraz bardzo niewielkie ilości węgla. 70% kryształów ma strukturę (110) [001] opisaną wskaźnikami Millera, zwaną teksturą Gossa.

Arkusze stali o teksturze Gossa wykonuje się w procesie obejmującym zespół operacji walcowania na gorąco, obróbki cieplnej, walcowania na zimno, obróbki cieplnej, ponownego walcowania na zimno oraz odwęglania na drodze obróbki cieplnej, odsiarczania i wyżarzania rekrytalizującego. Wlewki walcuje się na gorąco na taśmę lub arkusze o grubości poniżej 3,81 mm. Taśma jest poddawana następnie walcowaniu na zimno, z wyżarzaniem pomiędzy kolejnymi przejściami procesu walcowania, dając gotowy wyrób o grubości zmniejszonej o około 30%, który w procesie wyżarzania uzyskuje teksturę Gossa.

W stalach krzemowych z domieszkami boru i azotu sterowanie ilością tych domieszek powoduje ograniczenie rozrostu ziaren i rekrytalizację wtórną do struktury (110) [001]. Ograniczenie rozrostu ziaren zapewnia również siarka lecz część siarki jest związana z pierwiastkami łatwo tworzącymi siarczki, takimi jak mangan, tworząc zanieczyszczenia nie dające się usunąć ze stali. Tak więc całkowita zawartość siarki jest większa niż ilość zapewniająca ochronę przed rozrostem ziaren.

Ponadto duża zawartość siarki i niewielkie domieszki boru wywołują kruchość spoin stali krzemowych. Z powodu kruchości spoin nie jest możliwe zespawanie dwóch taśm walcowanych na gorąco, przeznaczonych do walcowania na zimno. Natomiast zmniejszenie zawartości siarki powoduje pogorszenie właściwości magnetycznych. Mając do wyboru dwie możliwości na ogół wybiera się dobrą spawalność stali.

Znany jest sposób wytwarzania stali krzemowej, w którym wytapia się stal krzemową zawierającą wagowo od 2,2% do 4,5% krzemu, od 0,0003% do 0,0035% boru, od 0,0030% do 0,0075% azotu, w proporcji do boru od 1 do 15 części na jedną część boru, od 0,02% do 0,05% manganu, od 0,003% do 0,025% siarki oraz żelazo, odlewa się stal, walcuje się stal na gorąco na taśmę, następnie walcuje się taśmę na zimno na ostateczną grubość, poddaje się stal odwęglaniu oraz prowadzi się ostateczne wyżarzanie rekrytalizujące nadające stali teksturę Gossa o postaci (110) [001] opisaną wskaźnikami Millera.

Zgodnie ze sposobem według wynalazku do wytopu stali wprowadza się od 0,01% do 0,10% cyny lub antymonu.

Arkusze ze stali krzemowej otrzymany sposobem według wynalazku zawiera wagowo od 2,2% do 4,5% krzemu, od 0,0003% do 0,0035% boru, od 0,0030% do 0,0075% azotu, w proporcji do boru od 1 do 15 części na jedną część boru, od 0,02% do 0,05% manganu, od 0,005% do 0,0025% siarki oraz 0,010% do 0,10% cyny lub antymonu oraz resztę żelaza.

Rozwiązanie według wynalazku opiera się na stwierdzeniu, że w wytopach stali krzemowej o określonym składzie, zawierających bor i azot, domieszka cyny lub antymonu ma podobne działanie ograniczające rozrost ziaren jak zwiększona zawartość siarki. Jednocześnie dodanie cyny nie zwiększa kruchości przy spawaniu, a właściwości magnetyczne stali są lepsze niż w przypadku stali bez domieszek cyny lub antymonu lecz zawierającej zwiększoną ilość siarki. Tak więc dodając cynę lub antymon uzyskuje się doskonałe właściwości magnetyczne, jak w stalach o podwyższonej zawartości siarki oraz pożądaną spawalność, jak w stalach o obniżonej zawartości siarki.

Korzystnie, doskonałe właściwości magnetyczne oraz dobrą spawalność uzyskuje się przez dodanie 0,10% cyny lub antymonu do stopów zawierających 0,010% siarki, przy czym ilość cyny lub antymonu jest tym większa im niższa jest zawartość siarki. Korzystnie do wytopu wprowadza się około 0,025% manganu, około 0,012% siarki oraz od 0,010% do 0,030% cyny. Korzystnie do wytopu wprowadza się od 0,02% do 0,03% manganu, od 0,009% siarki oraz od 0,020% do 0,030% cyny. W rozwiązaniu alternatywnym do wytopu wprowadza się od 0,030% do 0,040% manganu, od 0,013% do 0,019% siarki oraz od 0,020% do 0,050% cyny. Korzystnie do wytopu dodaje się od 0,0030% do 0,0100% antymonu oraz od 0,0030% do 0,0100% azotu, w proporcji od 1 do 15 części azotu na jedną część boru.

Dodatek manganu wynosi około 0,024% przy zawartości siarki do 0,006% oraz antymonu powyżej 0,04%. Natomiast przy zawartości siarki od 0,011% i zawartości antymonu powyżej 0,04% dodatek manganu wynosi około 0,034%. Stwierdzono również, że właściwości magnetyczne stali krzemowej ulegają dalszej poprawie przez nałożenie elektroizolacyjnej powłoki zawierającej bor na arkusz stali krzemowej walcowany na zimno, przez ostateczną obróbkę cieplną arkusza.

Korzystnie do powłoki dodaje się powyżej 0,0012% boru a zwłaszcza od 0,0012% do 0,0060% boru w stosunku do wagi arkusza. Przed nałożeniem elektroizolacyjnej powłoki, do wytopu wprowadza się około 0,013% siarki i około 0,02% cyny albo około 0,024% manganu, około 0,008% siarki i około 0,097% cyny.

Stwierdzono również, że początkowa temperatura operacji walcowania na gorąco ma istotny wpływ na przenikalność magnetyczną stali krzemowych z domieszką cyny lub antymonu. Arkusze stali walcowane na gorąco w temperaturze od 1200°C do 1300°C wykazywały wyższą przenikalność magnetyczną niż arkusze walcowane na gorąco w temperaturze od 1100°C do 1150°C.

Arkusz ze stali krzemowej uzyskuje się z wytopu zawierającego od 2,2% do 4,5% krzemu, od około 0,0003% do 0,0035% boru, od 0,0030% do 0,0100% azotu, w proporcji do boru od 1 do 15 części na jedną część boru, od 0,02% do 0,05% manganu, z domieszką siarki oraz cyny lub antymonu podaną powyżej. Resztę wytopu stanowi żelazo z przypadkowymi zanieczyszczeniami. Wytop zostaje odlany a następnie poddany walcowaniu na gorąco. Po wyżarzaniu gorący arkusz jest poddawany walcowaniu na zimno, korzystnie z wyżarzaniem pomiędzy kolejnymi przejściami, na ostateczną grubość, a następnie arkusz zostaje poddawany odwęglaniu.

Powstały arkusz o drobnych ziarnach, powstałych na skutek rekrytalizacji pierwotnej, pokrywa się powłoką z tlenku magnezowego, przed ostatecznym wyżarzaniem, nadającym stali strukturę Goss'a. Korzystnie stosuje się powlekanie elektrolityczne opisane w opisie patentowym Stanów Zjednoczonych Ameryki nr 3054 732. Na arkusz nakłada się jednorodną powłokę $Mg(OH)_2$ o grubości 0,127 mm. Korzystnie do powłoki wprowadza się bor przez zanurzenie arkusza w wodnym roztworze kwasu ortoborowego.

Ostatnią operację sposobu według wynalazku jest podgrzewanie powleczonego arkusza w atmosferze wodoru w celu wywołania wtórnego rozrostu ziaren, który zaczyna się w temperaturze około 950°C. W miarę podnoszenia temperatury z szybkością około 50°C na godzinę do 1000°C, następuje proces rekrytalizacji, a nagrzewanie prowadzi się do temperatury 1175°C, aby zapewnić całkowite usunięcie pozostałości węgla, siarki i azotu.

Przedmiot wynalazku został opisany w następujących przykładach.

Przykład I. Cztery laboratoryjne próbki stopiono w piecu indukcyjnym pod powłoką argonu. Próbki zawierały mieszaninę żelaza elektrolitycznego oraz 98% żelazokrzemu. Skład próbek obejmował 3,1% krzemu, 0,025% manganu, 0,012% siarki, od 0,0005% do 0,0010% boru, od 0,0045% do 0,0075% azotu, 0,10% miedzi oraz 0,035% chromu. Do poszczególnych próbek dodano cynę w ilości od 0,002% do 0,045%. Skład próbek po analizie przedstawia tablica I.

T a b l i c a I

Próbka	% Mn	% S	Mn/S	% Sn	% N
1	0,025	0,012	2,0	0,002	0,0069
2	0,024	0,012	2,0	0,010	0,0074
3	0,026	0,012	2,1	0,020	0,0046
4	0,025	0,011	2,3	0,045	0,049

Paski o grubości 44,45 mm zostały wycięte z wlewków uzyskanych po odlaniu próbek. Paski zostały poddane walcowaniu na gorąco od 1250°C, w sześciu przejściach na grubość rzędu 2,286 mm.

Po wytrawieniu paski poddano obróbce cieplnej w temperaturze 950°C, przy czym czas wygrzewania w temperaturze od 930°C do 950°C wynosił około 3 minut. Gorące paski poddano walcowaniu na zimno bezpośrednio na ostateczną grubość rzędu 27 mm. Paski materiału walcowanego na zimno odwęglano do zawartości węgla poniżej 0,006% przez wygrzewanie w ciągu 120 sekund w temperaturze 800°C w wodorze o temperaturze rosy równej 20°C przy zawartości cyny równej 0,10% poziom węgla po obróbce cieplnej odwęglającej wynosi około 0,010%. Powoduje to zwiększenie stratności rdzenia lecz nie wpływa na przenikalność magnetyczną. Niższą zawartość węgla oraz mniejszą stratność rdzenia można uzyskać przez zastosowanie atmosfery wyżarzającej o wyższej temperaturze rosy. Paski po odwęglaniu pokryto mleczkiem tlenku magnezowego nakładając około 40 mg mleczka na pasek. Do powłok niektórych pasków dodano boru przez zanurzenie pasków w 0,3% roztworze kwasu ortoborowego. Do powłoki przenika taka ilość boru, że zawartość boru w całym pasku wzrasta o 0,0012%. Powleczone paski poddano ostatecznemu wyżarzaniu obejmującemu nagrzewanie z szybkością 40°C na godzinę od 800°C do 1175°C w suchym wodorze i wygrzewaniu w tej temperaturze przez 3 godziny.

Wpływ zawartości cyny na przenikalność magnetyczną oraz stratność rdzenia przy 1,7 T dla 60 Hz pokazuje fig. 1 stanowiąca wykres przenikalności magnetycznej przy 800 A/m w funkcji procentowej zawartości cyny w wytopie. Krzywa A reprezentuje próbki pokryte powłoką zawierającą bor, natomiast krzywa B reprezentuje próbki pokryte powłoką bez boru. Na krzywych oznaczono stratność w miliwatach na funt oraz w watach na kilogram. Z krzywych wynika, że domieszka 0,010% cyny, zwłaszcza z domieszką boru w powłoce powierzchniowej, w znacznym stopniu polepsza właściwości magnetyczne. Optymalna zawartość cyny wynosi 0,020%.

Przykład II. Podobnie jak w przykładzie I dwie próbki stopiono w piecu indukcyjnym pod pokrywą argonu, stosując żelazo elektrolityczne i 98% żelazokrzemu, przy czym obie próbki zawierały 3,1% krzemu, 0,0010% boru, od 0,0040% do 0,0050% azotu oraz pozostałe składniki, jak to przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Próbka	% Mn	% S	% C	% Sn
5	0,028	0,013	0,036	<0,002
6	0,026	0,013	0,035	0,02

Obróbka próbek była identyczna jak w przykładzie I, poza tym, że walcowanie na gorąco przeprowadzono w pięciu różnych temperaturach a zawartość boru w powłokach uległa zwiększeniu i odpowiadała zawartości 0,0015% boru w taśmie wykonanej z żelazokrzemu. Wartość przenikalności magnetycznej dla próbek 5 i 6 przedstawiono na fig. 2 przy ostatecznym wyżarzaniu bez dodania boru do powłoki, a na fig. 3 po dodaniu boru do powłoki. Stratność w milimetrach na funt oraz w watach na kilogramach podano w odpowiednich punktach.

Porównanie właściwości magnetycznych a zwłaszcza przenikalności na fig. 2 i 3 wykazuje wyższość próbek zawierających cynę. Nawet bez dodania boru do powłoki przenikalność jest wyższa niż $2387,6 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$ lub bliska tej wartości, przy walcowaniu na gorąco w temperaturach 1200°C i 1250°C, natomiast po dodaniu boru do powłoki przenikalność magnetyczna przewyższa $2387,6 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$, przy walcowaniu we wszystkich podanych temperaturach poza temperaturą najniższą.

Przykład III. Podobnie jak w przykładzie I i II przygotowano siedem próbek zawierających 3,1% krzemu, 0,1% miedzi, 0,03% chromu oraz pozostałe składniki przedstawione w tablicy 3.

Tablica 3

Próbka	% Mn	% S	% C	% B	% N	% Sn
7	0,028	0,013	0,036	0,0007	0,0043	<0,002
8	0,026	0,013	0,035	0,0008	0,0038	0,02
9	0,025	0,014	0,034	0,0006	0,0038	0,047
10	0,025	0,009	0,035	0,0004	0,0038	<0,002
11	0,025	0,009	0,035	0,0004	0,0038	0,023
12	0,027	0,010	0,035	0,0005	0,0035	0,048
13	0,024	0,008	0,036	0,0008	0,0036	0,097

Obróbka stali była identyczna jak w przykładzie I, natomiast pięć różnych temperatur walcowania na gorąco dobrano według przykładu II. Bor został wprowadzony do powłok tlenku magnezowego, podobnie jak w przykładzie II, co zaznaczono w tablicach 4 i 5. Zawartość boru w powłoce każdej próbki odpowiadała 0,0012% boru w pasku wykonanym z żelazokrzemu. Właściwości magnetyczne pasków wykonanych z żelazokrzemu określone w czasie próby, podano w tablicy 4, dla próbek zawierających 0,013% siarki oraz w tablicy 5, dla próbek zawierających 0,009% siarki.

T a b l i c a 4

Właściwości magnetyczne po ostatecznym wyżarzaniu próbek
o zawartości 0,013 % siarki

Temperatura walcowania na gorąco °C	Próbka 7				Próbka 8				Próbka 9			
	MgO		MgO + B		MgO		MgO + B		MgO		MgO + B	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1100	2,816	1822	2,679	1906	2,736	1921	1,830	2270	2,043	2175	1,599	2358
1150	2,800	1867	1,922	2184	1,687	2321	1,555	2390	1,733	2358	1,584	2377
1200	2,171	2110	1,542	2331	1,570	2378	1,537	2416	1,498	2411	1,463	2426
1250	1,863	2228	1,537	2338	1,555	2401	1,531	2401	1,544	2410	1,482	2421
1300	2,356	2081	2,061	2130	1,676	2334	1,559	2395	1,614	2401	1,513	2411

A — stratność (W/kg przy 1,7 T)

B — przenikalność magnetyczna (u. 10^{-6} H/m przy 800 A/m)

T a b l i c a 5

Właściwości magnetyczne po ostatecznym wyżarzaniu próbek
o zawartości 0,009% siarki

Temperatura walcowania na gorąco °C	Próbka 10				Próbka 11				Próbka 12				Próbka 13			
	MgO		MgO + B		MgO		MgO + B		MgO		MgO + B		MgO		MgO + B	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1100	2,860	1827	2,860	1847	2,860	1860	2,556	2023	2,989	1892	2,134	2136	—	—	—	—
1150	2,860	1840	2,767	1875	2,574	2038	1,632	2316	2,525	2032	1,610	2337	—	—	—	—
1200	2,827	1848	2,763	1902	1,634	2329	1,500	2376	1,845	2229	1,502	2373	1,768	2362	1,707	2424
1250	2,697	1921	2,279	2069	1,551	2371	1,493	2383	1,735	2277	1,491	2393	—	—	—	—
1300	2,842	1892	1,993	2198	2,030	2181	1,617	2336	2,637	1995	1,755	2275	—	—	—	—

A — stratność (W/kg przy 1,7 T)

B — przenikalność magnetyczna (u. 10^{-6} H/m przy 800 A/m)

Przykład IV. Podobnie jak w przykładach I, II i III przygotowano 10 próbek o składzie: 3,1% krzemu, 0,10% miedzi, 0,03% chromu, 0,04% węgla, 0,035% manganu, od 0,0005% do 0,0010% boru oraz od 0,0035% do 0,0065% azotu. Do pięciu próbek dodano 0,05% cyny. Skład próbek oraz właściwości materiału otrzymanego z tych próbek przedstawiono w tablicy 6.

T a b l i c a 6

Próbka	% Mn	% S	% Sn	Pęknięcie równoległe	Ilość pęknięć poprzecznych/metr
14	0,034	0,010	<0,002	nie	0
15	0,035	0,015	<0,002	nie	16
16	0,037	0,016	<0,002	nie	64
17	0,038	0,019	<0,002	tak	173
18	0,034	0,022	<0,002	tak	192
19	0,034	0,010	0,045	nie	4
20	0,035	0,013	0,040	nie	37
21	0,032	0,015	0,046	nie	65
22	0,036	0,017	0,045	nie	75
23	0,035	0,019	0,049	—	—

Z tablicy wynika, że w miarę wzrostu zawartości siarki ilość pęknięć w spoinie zwiększa się, a przy zawartości siarki od 0,019% powstają również pęknięcia równoległe do osi wzdłużnej spoiny. Tak więc występowanie pęknięć w spoinach jest uzależnione przede wszystkim od zawartości siarki. Aby potwierdzić te wnioski przeprowadzono próbę, w której elektrodę z wolframu o średnicy 1,58 mm przesunięto ponad powierzchnię próbki walcowanej na zimno o grubości 1,524 mm, zamocowanej w uchwycie, w odległości 0,79 mm. Przy natężeniu prądu równym 50 A i szybkości przemieszczania elektrody równej 3,3 mm na sekundę uzyskano strefę stopionego metalu o szerokości od 2,54 mm do 3,81 mm.

Po przejściu elektrody próbki można było podzielić na trzy kategorie:

1 — próbki, w których wystające pęknięcia były ułożone równoległe do osi wzdłużnej, przy czym dodatkowo występowały inne drobne pęknięcia;

2 — próbki nie mające pęknięć równoległych do osi wzdłużnej spoiny, lecz mające przypadkowe pęknięcia na spoinie lub w pobliżu spoiny, usytuowane pod pewnym kątem do spoiny;

3 — próbki bez pęknięć, co zostało potwierdzone przy użyciu barwnika stosowanego zwykle do wykrywania pęknięć.

Przeprowadzona próba wykazuje w przesadny sposób tendencję materiału do tworzenia pęknięć, ponieważ uważa się, że materiał, w którym występują wyłącznie pęknięcia poprzeczne nadaje się do spawania przy użyciu odpowiednich technik.

Na figurach 4 i 5 przedstawiono właściwości magnetyczne dziesięciu próbek po ich ostatecznym wyżarzaniu. Przed wyżarzaniem do powłok nie był dodany bor. Na figurach podano stratność rdzenia przy 1,7 T i 60 Hz. Wykresy wykazują lepsze właściwości magnetyczne próbek zawierających cynę. Uwzględniając właściwości materiału przy spawaniu, co podaje tablica 6 oraz właściwości magnetyczne przedstawione na fig. 4 i 5, przy podawaniu cyny można uzyskać wysoką przenikalność magnetyczną i niską stratność rdzenia dla próbek o niskiej zawartości siarki, które nie wykazują pęknięć równoległych w procesie spawania.

Przykład V. W piecu indukcyjnym pod pokrywą argonu stopiono pięć próbek z żelaza elektrolitycznego i żelazokrzemu o zawartości 98%. Wszystkie próbki zawierały 3,1% krzemu, od 0,022% do 0,026% manganu, od 0,003% do 0,005% siarki, mniej niż 0,0001% lub od 0,0007 do 0,0010% boru, od 0,0041% do 0,0058% azotu, 0,10% miedzi, 0,03% chromu oraz od 0,03% do 0,041% węgla. Do poszczególnych próbek dodano antymon w zakresie od 0,001% do 0,041%. Tablica 7 podaje w przybliżeniu skład próbek określony na drodze analizy w kolejności wzrastającej zawartości antymonu. Skład procentowy próbek został określony wagowo.

Tablica 7

Próbka	% Sb	% Mn	% S	Mn/S	% B	% N	B/N
1	0,001	0,025	0,005	5,0	0,0007	0,0041	6
2	0,014	0,024	0,006	4,0	0,0008	0,0058	7
3	0,030	0,022	0,005	4,4	0,0007	0,0045	6,5
4	0,031	0,031	0,006	5,0	—	0,0055	—
5	0,041	0,026	0,006	4,3	0,0008	0,0058	7

Z wlewków odlanych z tych próbek wycięto paski o grubości 44,45 mm, które poddano walcowaniu na gorąco od temperatury 1200°C, w sześciu przejściach, tworząc paski o grubości 2,286 mm. Po trawieniu próbki były wygrzewane w temperaturze 950°C, przy czym wygrzewanie w temperaturze pomiędzy 930° i 950°C wynosi około 180 sekund. Gorące paski poddano walcowaniu na zimno do grubości końcowej 0,279 mm. Następnie paski poddano odwęglaniu do zawartości węgla poniżej 0,006%, przez wygrzewanie w czasie 120 sekund w temperaturze 800°C w wodrze o temperaturze rosy 20°C. Dla próbek o zawartości 0,04% antymonu, zawartość węgla po odwęglaniu wynosi około 0,015%. Powoduje to zwiększenie stratności lecz nie wpływa na przenikalność magnetyczną. Niższe zawartości węgla oraz niższą stratność można uzyskać na drodze wyżarzania w atmosferze o wyższej temperaturze rosy. Odwęglone paski przemyto mleczkiem magnezowym zwiększając ich ciężar około 40 mg na pasek. Kilka z pasków powleczone 0,5–1% roztworem wodnym kwasu ortoborowego, dodając do powłoki taką ilość boru, że gdyby został on wchłonięty przez żelazokrzem, zawartość boru w stopie zwiększyłaby się od 0,0012% do 0,0024% (tablica 8). Powleczone paski poddano ostatecznemu wyżarzaniu polegającemu na nagrzewaniu od 800°C do 1175°C, z szybkością 40°C na godzinę, w atmosferze suchego wodoru, i wygrzewaniu w tej temperaturze w ciągu trzech godzin.

Wyniki testów Epsteina przeprowadzonych na pakietach złożonych z pasków przygotowanych z próbek od 1 do 5, według określenia właściwości magnetycznych po ostatecznym wyżarzaniu przedstawiono w tablicy 8.

T a b l i c a 8

Właściwości magnetyczne próbek 1-5 po ostatecznym wyżarzaniu
Przybliżona zawartość boru w powłoce

Próbka	0		0,0012 %		0,0024 %	
	A	B	A	B	A	B
1	2,950	1887	2,930	1891	2,855	1882
2	2,609	2002	1,645	2331	1,641	2316
3	2,633	2035	1,641	2342	1,991	2210
4	2,917	1871	2,873	1878	2,868	1870
5	2,393	2061	1,522	2387	1,509	2386

A — stratność (straty energii) w W/kg przy indukcji magnetycznej 1,7 T przy prądzie przeniennym o częstotliwości 60 Hz

B — przenikalność magnetyczna (u. 10^{-6} przy 800 A/m)

Z powyższych danych wynika, że dla określonej powłoki stratność maleje, a przenikalność magnetyczna wzrasta w miarę wzrostu zawartości antymonu, o ile próbka zawiera bor. Dla próbki o określonej zawartości antymonu, nałożenie powłoki zawierającej bor, zmniejsza stratność i zwiększa przenikalność magnetyczną. Niewielka stratność i wysoka przenikalność magnetyczna pasków wykonanych z próbki 5 (0,041% antymonu), wyżarzanych po nałożeniu powłoki z kwasu ortoborowego, jest porównywalna z właściwościami dostępnych na rynku żelazokrzemów o wysokiej przenikalności magnetycznej. Tak więc dodatek antymonu rzędu 0,01%, zwłaszcza przy obecności boru w powłoce powoduje znaczne polepszenie właściwości magnetycznych.

Dla próbek od 1 do 5 określono spawalność przez wykonanie spoiny na długości 127 mm na pasku walcowanym na zimno o grubości 1,65 mm. Żadna z próbek nie wykazywała żadnych pęknięć ani kruchości spawania. Laboratoryjne próbki o tej samej zawartości manganu, lub dodatku antymonu, zawierające 0,02% siarki aby zapobiec rozrostowi ziaren, wykazują w tej samej próbie znaczne pęknięcia. Wyniki prób wskazują, że występowanie pęknięć jest uzależnione przede wszystkim od zawartości siarki, co potwierdzono wykonując spoinę przy pomocy elektrody wolframowej o średnicy 1,58 mm, przesuwanej w odległości 0,79 mm ponad powierzchnią paska walcowanego na zimno zaciśniętego w uchwycie. Przy natężeniu prądu równym 80 A oraz szybkości przemieszczania elektrody rzędu 3,3 mm na sekundę, uzyskano próbę stopionego metalu o szerokości od 2,54 do 3,41 mm.

Przykład VI. Podobnie jak w przykładzie I przygotowano dwie próbki laboratoryjne. Skład tych próbek oznaczonych 6 i 7 był zasadniczo taki sam, jak skład próbek 2 i 5, poza zwiększoną zawartością azotu. Po przeprowadzeniu analizy określono skład próbek po stopieniu, przedstawiony w tablicy 9.

T a b l i c a 9

Próbka	% Sb	% Mn	% S	% B	% N	B/N
6	0,014	0,025	0,005	0,0010	0,0100	(0,10)*
7	0,038	0,024	0,003	0,0010	0,0086	(0,11)*

* — nie sprawdzona zawartość boru. 0,0010% boru dodano do wytopu

Obróbka próbek aż do wyżarzania ostatecznego była identyczna jak w przykładzie V.

Zawartość boru w powłoce zmieniała się o 0,0012% w zakresie od 0 do 0,0060% w przeliczeniu na zawartość boru w pasmie żelazokrzemu. Po przeprowadzeniu testu Epsteina dla pakietu pasków uzyskano przenikalność magnetyczną oraz stratność przedstawioną w tablicy 10.

Z powyższych danych wynika, że właściwości magnetyczne ulegają poprawie przy zastosowaniu powłok zawierających bor. Stratność ulega zmniejszeniu a przenikalność magnetyczna wzrasta. Polepszenie właściwości magnetycznych jest wprost proporcjonalne do zawartości boru w powłoce. Porównanie próbek 6 i 7 wskazuje, że optymalna zawartość domieszek boru w powłoce jest większa w przypadku próbek o większej zawartości azotu. Tak więc optymalna zawartość boru w powłoce wynosi od 0,0036% do 0,0060% dla próbki 6 zawierającej w stanie stopionym 0,0100% azotu, natomiast optymalna zawartość boru dla próbki 7 wynosi od 0,0024% do 0,0048% przy zawartości 0,0086% azotu. W porównaniu właściwości próbki 6 (0,014%

T a b l i c a 10
Właściwości magnetyczne próbek 6 i 7
po ostatecznym wyżarzaniu

% boru w powłoce	Próbka 6		Próbka 7	
	A	B	A	B
0	1,903	2244	2,622	2007
0,0012	1,612	2334	1,621	2356
0,0024	1,592	2352	1,480	2382
0,0036	1,540	2353	1,482	2382
0,0048	1,478	2372	1,568	2370
0,0060	1,498	2366	1,656	2309

A — stratność jak w tablicy 8

B — przenikalność magnetyczna jak w tablicy 8

antymonu, powłoka zawierająca 0,0012% boru) z próbką 2 (również 0,014% antymonu, powłoka zawierająca 0,0012% boru) wykazują, że dla niższych zawartości antymonu wyższa zawartość azotu (0,0100% i 0,0058%) polepsza właściwości magnetyczne. Poprawa właściwości magnetycznych spowodowana zwiększoną zawartością azotu nie występuje przy wyższej zawartości antymonu, w próbce 5 i 7.

Przykład VII. Siedem próbek laboratoryjnych o numerach od 8 do 14 przygotowano podobnie jak w przykładzie V. Skład próbek po stopieniu był podobny jak skład próbek od 1 do 5, poza następującymi składnikami: 0,034% manganu, od 0,030 do 0,040% węgla, 0,0010% boru, od 0,0027% do 0,0052% azotu, od 0,006% do 0,021% siarki w próbkach nie zawierających antymonu (próbki 8–12), oraz od 0,006% do 0,011% siarki w próbkach zawierających antymon (0,045% antymonu w próbce 13 i 0,046% antymonu w próbce 14). Tablica 11 przedstawia przybliżone zawartości poszczególnych składników określone w wyniku analizy.

T a b l i c a 11
Skład próbek i właściwości magnetyczne

Próbka	% Sb	% S	Mn/S	% N	Bez dodatku boru w powłoce		Z dodatkiem boru w powłoce*	
					A	B	A	B
8	—	0,006	5,7	0,0027	2,956	1877	2,596	1887
9	—	0,009	3,8	0,0035	3,018	1858	2,917	1862
10	—	0,013	2,6	0,0044	3,038	1877	3,011	1882
11	—	0,017	2,0	0,0045	3,036	1872	2,857	1939
12	—	0,021	1,6	0,0050	2,98	2228	1,667	2348
13	0,045	0,006	5,7	0,0038	1,634	2321	1,694	2344
14	0,046	0,011	3,2	0,0037	1,579	2358	1,581	2406

* — 0,0012 % w powłoce, w stosunku do ciężaru próbki

A — jak w tablicy 4

B — jak w tablicy 4

Z powyższych danych wynika, że pod nieobecność antymonu przenikalność magnetyczna jest niewielka dopóki zawartość siarki nie zostanie zwiększona od 0,021% (próbka 12). Jednakże przy zawartości 0,046% antymonu i tylko 0,011% siarki (próbka 14) uzyskuje się wysoką przenikalność magnetyczną równą $2358 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$, bez dodawania boru w powłoce, natomiast po dodaniu boru do powłoki uzyskuje się jeszcze wyższą przenikalność magnetyczną równą $2406 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$.

Sprawdzono spawalność próbek od 8 do 14 wykonując test opisany w przykładzie V. Paski walcowane na zimno miały grubość 1,52 mm. Test określał tendencję materiału do pękania. Uważa się, że materiał wykazujący wyłącznie pęknięcia poprzeczne w ilości mniejszej niż 10 pęknięć na metr nadaje się do spawania przy użyciu właściwych technik takich jak na przykład użycie wypełniacza i węższej strefy stopionego metalu. Wyniki testu określającego spawalność dla próbek od 8 do 14 podaje tablica 12, w której podano również zawartość siarki i antymonu w próbkach.

Tablica 12
Skład próbek oraz ich spawalność

Próbka	% S	% Sb	Pęknięcia równoległe*	Ilość pęknięć po- przecznych/metr
8	0,006	0	nie	0
9	0,009	0	nie	0
10	0,013	0	nie	4
11	0,017	0	nie	63
12	0,021	0	tak	200
13	0,006	0,045	nie	8
14	0,011	0,046	nie	4

* — rozciągające się na całą długości spoiny

Z powyższych danych wynika, że ilość poprzecznych pęknięć wzrasta wraz ze zwiększaniem zawartości siarki powyżej 0,01%. W próbkach zawierających więcej niż 0,015% siarki występuje znaczna ilość pęknięć poprzecznych, natomiast pęknięcia wzdłużne wskazujące na wysoką kruchość spawania, występują przy zawartości siarki rzędu 0,021%. Próbki mające około 10 pęknięć poprzecznych na metr nadają się do spawania. Chociaż próbki od 8 do 11 są wolne od kruchości spawania, ich właściwości magnetyczne są słabe. Natomiast próbki 13 i 14 zawierające antymon wykazują dobrą spawalność i jednocześnie doskonałe właściwości magnetyczne.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób wytwarzania stali krzemowej o teksturze Gossa polegający na tym, że wytapia się stal krzemową zawierającą wagowo od 2,2% do 4,5% krzemu, od 0,0003% do 0,0035% boru, od 0,0030% do 0,0075% azotu, w proporcji do boru od 1 do 15 części azotu na jedną część boru od 0,02% do 0,05% manganu, od 0,005% do 0,025% siarki oraz żelazo, odlewa się stal, walcuje się stal na gorąco na taśmę, następnie walcuje się taśmę na zimno na ostateczną grubość i poddaje się stal odwęglaniu oraz rekrytalizacji, **znamienny tym**, że do wytopu stali wprowadza się od 0,01% do 0,10% cyny lub antymonu.

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że do wytopu wprowadza się około 0,025% manganu, około 0,012% siarki oraz od 0,010% do 0,030% cyny.

3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że do wytopu wprowadza się od 0,02% do 0,03% manganu, od 0,009% siarki i od 0,020% do 0,030% cyny.

4. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że do wytopu wprowadza się od 0,030% do 0,040% manganu, od 0,013% do 0,019% siarki oraz od 0,020% do 0,050% cyny.

5. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że do wytopu wprowadza się około 0,013% siarki i około 0,02% cyny, zaś arkusz stali walcowanej na zimno pokrywa się przed obróbką cieplną elektroizolacyjną powłoką na bazie stali krzemowej z dodatkiem około 0,0015% boru.

6. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że do wytopu wprowadza się około 0,024% manganu, około 0,008% siarki i około 0,097% cyny, zaś arkusz stali walcowanej na zimno pokrywa się przed obróbką cieplną elektroizolacyjną powłoką na bazie stali krzemowej z dodatkiem 0,0012% boru.

7. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że do wytopu dodaje się od 0,0030% do 0,0100% antymonu oraz od 0,0030% do 0,0100% azotu, w proporcji od 1 do 15 części azotu na jedną część boru.

8. Sposób według zastrz. 7, **znamienny tym**, że do wytopu dodaje się około 0,024% manganu, do 0,006% siarki oraz powyżej 0,04% antymonu.

9. Sposób według zastrz. 7, **znamienny tym**, że do wytopu dodaje się około 0,034% manganu, do 0,011% siarki oraz powyżej 0,04% antymonu.

10. Sposób według zastrz. 7, **znamienny tym**, że odwęglony arkusz stali pokrywa się przed obróbką cieplną elektroizolacyjną powłoką zawierającą od 0,0012% do 0,0060% boru w stosunku do wagi arkusza.

11. Sposób według zastrz. 8 albo 9, **znamienny tym**, że odwęglony arkusz stali pokrywa się przed obróbką cieplną elektroizolacyjną powłoką zawierającą powyżej 0,0012% boru w stosunku do wagi arkusza.

