

Artur WODZYŃSKI  
Maciej SULIGA  
Krzysztof CHWASTEK

## BLACHY ELEKTROTECHNICZNE O ZIARNACH ZORIENTOWANYCH – – WYBRANE ZAGADNIENIA

**STRESZCZENIE** *Blachy o ziarnach zorientowanych są istotną grupą materiałów magnetycznych stosowanych w elektrotechnice głównie w magnetowodach transformatorów. W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące optymalizacji procesu technologicznego wytwarzania tych materiałów, metody doskonalenia ich struktury domenowej oraz światowe trendy rozwojowe.*

**Słowa kluczowe:** *inżynieria materiałów magnetycznych, blachy o ziarnach zorientowanych*

### 1. WSTĘP

---

Blachy o ziarnach zorientowanych (oznaczane jako GO od ang. *grain-oriented*) stanowią drugi po blachach o ziarnach niezorientowanych pod względem wielkości segment w grupie materiałów magnetycznie miękkich. W 2006 roku ich udział w rynku

---

**mgr inż. Artur WODZYŃSKI<sup>1)</sup>**  
e-mail: artur.wodzynski@trw.com

**dr hab. inż. Maciej SULIGA<sup>2)</sup>**  
e-mail: suliga@wip.pcz.czyst.pl

**dr hab. inż. Krzysztof CHWASTEK<sup>2)</sup>**  
e-mail: krzych@el.pcz.czyst.pl

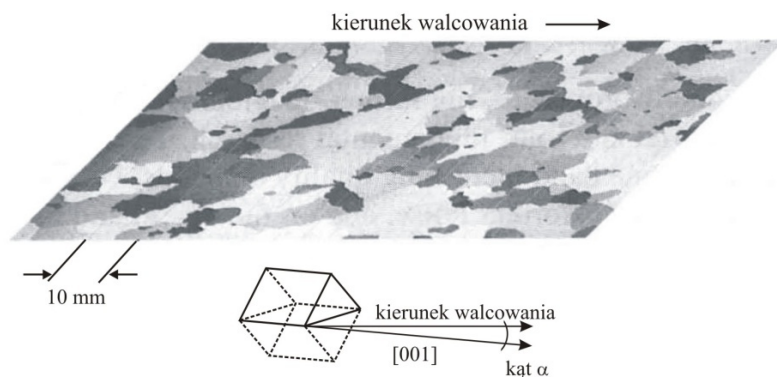
<sup>1)</sup> TRW Polska,  
ul. Rolnicza 33, 42-200 Częstochowa

<sup>2)</sup> Politechnika Częstochowska,  
ul. J. H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa

materiałów magnetycznie miękkich wyniósł około 16% (około 1,7 mln ton), przy czym w tym samym roku odnotowano rekordowy wzrost ich produkcji (o 11%) [1]. W pracy [2] zawarto sugestię, że roczny wolumen wyprodukowanych blach elektrotechnicznych o ziarnach zorientowanych może być miarą rozwoju krajów uprzemysłowionych, ponieważ nie można zastąpić tego materiału w magnetowodach transformatorów energetycznych, generatorów i innych urządzeń elektrycznych. Głównym czynnikiem stymulującym rozwój tej gałęzi przemysłu metalurgicznego jest wzrastające zapotrzebowanie na energię elektryczną w krajach rozwijających się, jak Chiny czy Indie, co pociąga za sobą konieczność rozbudowy istniejącej infrastruktury oraz instalacji nowych transformatorów, wykorzystujących rdzenie z blach GO. Według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii (International Energy Agency – IEA) do roku 2030 przewidywany globalny przyrost zdolności wytwarzania energii wyniesie prawie 3%, tj. 150 GW.

Aktualnie sytuacja na rynku blach transformatorowych uległa jednak pogorszeniu w związku z trwającym od 2007 r. kryzysem światowej gospodarki oraz z nadprodukcją blach w stosunku do istniejącego popytu. Według oficjalnych informacji łączne zdolności produkcyjne w zakresie blach transformatorowych na świecie osiągnęły w 2012 r. poziom 3,0 mln ton, przy popycie szacowanym na około 2,4-2,6 mln ton [3]. Pomiędzy producentami rozpoczęła się wojna cenowa, a niektóre państwa, np. USA, wszczęły postępowania antydumpingowe w celu ochrony swoich wytwórców.

Współcześnie produkowane blachy o ziarnach zorientowanych można podzielić na tzw. blachy konwencjonalne (CGO – Conventional Grain Oriented) i blachy superzorientowane (HGO – High Grain Oriented) [4, 5]. Blachy konwencjonalne charakteryzują się średnim rozrzutem orientacji kierunków (110) w kierunku walcowania rzędu  $7^\circ$ , co pozwala na osiągnięcie indukcji magnetycznej  $B_{10}$  na poziomie 1,85 T. W blachach typu HGO tekstura jest bardziej doskonała, co wyraża się średnim rozrzutem orientacji kierunków (110) rzędu  $(3 - 4)^\circ$  oraz indukcją  $B_{10}$  około 1,95 T, por. rysunek 1. Blachy te wykazują ponadto niższą o około 20% stratność w porównaniu ze stratnością blach konwencjonalnych.



**Rys. 1. Struktura blachy elektrotechnicznej z wyróżnionym kątem łatwego magnesowania [6]**

Technologia blach o podwyższonym stopniu zorientowania opracowana została około 40 lat temu w Japonii, gdzie określano je w literaturze fachowej jako blachy Hi-B. Ogólnie technologia ta pozwoliła na:

- zwiększenie jednorodności blach poprzez usunięcie szkodliwych domieszek, głównie wtrąceń niemetalicznych, utrudniających ruch ścian domenowych w procesie magnesowania blachy,
- poprawę stopnia sterowania blach, a w konsekwencji ponad dwukrotne zmniejszenie odchylenia kierunku łatwego magnesowania od kierunku walcowania blachy, co prowadzi do wzrostu indukcji magnetycznej,
- optymalizację wpływu naprężeń mechanicznych na strukturę domenową dzięki użyciu powierzchniowych warstw izolacyjnych. Obok ograniczenia międzywarstwowych prądów wirowych w rdzeniu warstwa izolacyjna pozwala na wprowadzenie do blachy naprężeń rozciągających, które prowadzą do indukowania w blasze jednoosiowej anizotropii natury magnetosprężystej zgodnej z kierunkiem łatwej osi magnesowania kreowanym w wyniku walcowania.

## 2. PROCES PRODUKCJI BLACH O ZIARNACH ZORIENTOWANYCH

---

Obecnie technologia Gossa, stosowana do produkcji blach konwencjonalnych, pozwala na wytwarzanie blach o zawartości 3,2% Si wykazujących stratność 0,75 W/kg przy indukcji 1,9 T oraz częstotliwości 50 Hz. Produkowane blachy orientowane mają grubość od 0,23 mm do 0,35 mm i szerokości do 1270 mm. Dla blach zorientowanych typu Hi-B przy tej samej indukcji i częstotliwości uzyskuje się mniejszą stratność, równą 0,6 W/kg [7, 8]. Poza technologią Hi-B opracowaną przez Nippon Steel, opracowane zostały w latach późniejszych inne technologie produkcji blach o udoskonalonych właściwościach m.in. przez Kawasaki Steel [9] (blachy RG-H), Allegheny Ludlum i ARMCO.

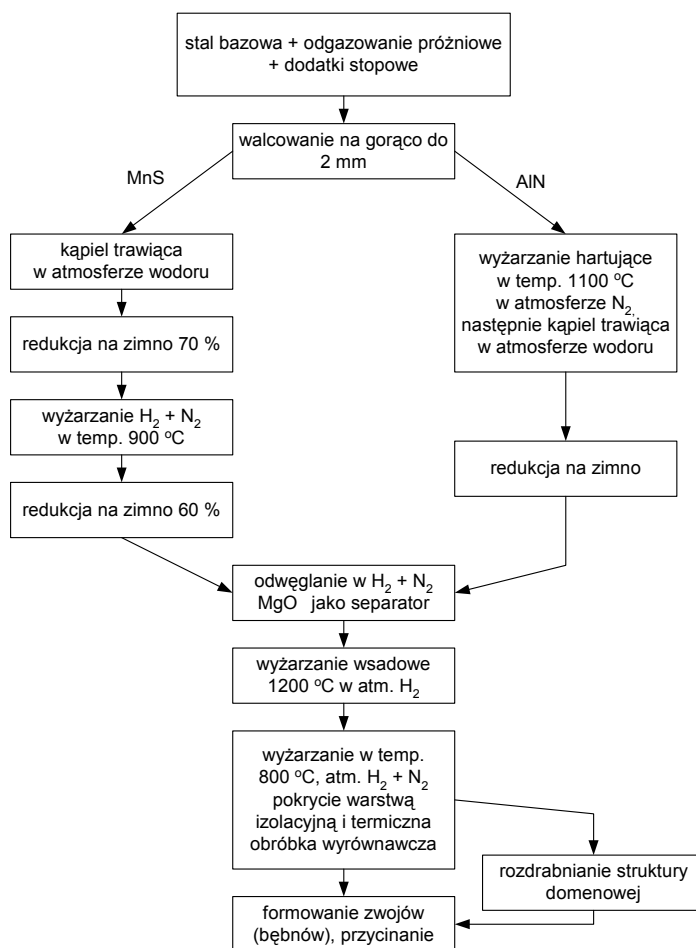
Proces produkcyjny blach o ziarnach zorientowanych jest bardziej skomplikowany niż dla blach o ziarnach niezorientowanych. Celem procesu technologicznego jest osiągnięcie ziaren o orientacji (110)[001] po wtórnej rekrytalizacji. Zasadnicze etapy produkcji blach GO przedstawiono poniżej [10, 11]:

- przetapianie stopu wyjściowego (ang. master alloy) o zawartości krzemu (2,9 – 3,2) wt. %, odgazowanie próżniowe, dodanie wybranych domieszek kadziowych, np. Al, Mn, Sb, S, N (procentowa koncentracja domieszek nie przekracza kilkuset ppm) oraz ciągle odlewanie;
- powtórna obróbka cieplna w temperaturze (1250 – 1350)°C, po której następuje walcowanie kęsisk płaskich na gorąco do grubości około 2 mm, wyżarzanie w temperaturze (900 – 1000)°C i nagłe schładzanie. Domieszki w postaci wytrąceń, które tworzą się pod koniec etapu poprzedniego rozpuszczają się po powtórnej obróbce cieplnej i ponownie wytracają się podczas walcowania na gorąco i wyżarzania. W tym etapie należy zadbać szczególnie o dobór właściwych temperatur i interwałów czasu przetwarzania stopu, ponieważ rozmiar tworzących się w tym etapie domieszek ma kluczowe znaczenie dla procesu rekrytalizacji;

- walcowanie na zimno przeprowadzane w dwóch etapach (~ 70% oraz ~55%) do końcowej grubości blachy 0,23, 0,27 lub 0,35 mm, przeplecione obróbką wyżarzającą w temperaturze 800°C i 1000°C. W tym etapie kumuluje się duża ilość deformacji, co sprzyja całkowitej rekrytalizacji w kolejnym etapie wyżarzania;
- wyżarzanie odwęglające w atmosferze ciekłego wodoru w temperaturze (800 – 850)°C. W trakcie tego procesu zawartość procentowa węgla jest ograniczona do poziomu poniżej 50 ppm. W tym etapie zachodzi całkowita rekrytalizacja pierwotna. Z uwagi na fakt występowania w stopie domieszek MnS, AlN itp. rozwój nowo tworzących się ziaren jest utrudniony. Ich przeciętny rozmiar wynosi (15 – 20) μm;
- pokrycie warstwą MnO i powolne wyżarzanie arkuszy pod zamknięciem przez wiele godzin w temperaturze 1200°C w celu ograniczenia utleniania (ang. „box annealing”), a następnie schładzanie. W trakcie tego etapu powstają wyjątkowo duże i silnie zorientowane ziarna (110)[001] w obrębie pierwotnej matrycy, a pod jego koniec obejmują one całą objętość blachy. Proces ten interpretuje się w ten sposób, że ziarna (110)[001] wykazują znacznie wyższą mobilność granic w porównaniu z większością ziaren pierwotnych, w których dominuje tekstura {111}⟨110⟩ oraz {111}⟨112⟩. Szacuje się, że zaledwie jedno ziarno na 106 spośród ziaren pierwotnych wykazuje orientację (110)[001], co tłumaczy duży rozmiar końcowych ziaren po wtórnej rekrytalizacji. Pod koniec wyżarzania pod zamknięciem wtrącenia ulegają całkowitemu rozpuszczeniu, dzięki czemu unika się ich szkodliwego wpływu na proces przemagnesowania.
- pokrycie warstwą fosforanową i końcowa termiczna obróbka wyrównawcza (ang. *thermal flattening*). Obróbka wyrównawcza przeprowadzana jest w piecu przelotowym, w którym istnieje możliwość kontrolowania naciągu taśmy. W miarę, jak taśma stygnie, izolacja utwardza się wcześniej niż substrat, a na skutek różnicy pomiędzy wartościami współczynników rozszerzalności cieplnej, w taśmie wytwarza się korzystnie niski poziom naprężeń (zmiana stratności po ponownym procesie wyżarzania nie przekracza 5%).

Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie dwie odmiany procesu produkcyjnego blach o ziarnach zorientowanych: metodę konwencjonalną, w której rolę inhibitora pełni siarczek manganu oraz metodę udoskonaloną, wykorzystującą jako inhibitor azotek glinu. Ta ostatnia metoda pozwala na otrzymywanie stali o podwyższonej przenikalności magnetycznej.

Na podstawie literatury [11-16] można stwierdzić, że kluczowym procesem odpowiedzialnym za kreowanie zorientowanej struktury w materiale jest rekrytalizacja wtórna, która zachodzi w odpowiednio walcowanym na zimno materiale, w czasie jego wyżarzania przy wysokiej temperaturze. Do prawidłowego przebiegu rekrytalizacji wtórnej i powstania odpowiedniej tekstury konieczne jest występowanie w materiale drobno dyspersyjnych związków obcej fazy. Rolę obcej fazy (tzw. inhibitora) mogą pełnić różne związki chemiczne, jednak w praktyce przemysłowej najczęściej wykorzystuje się azotki glinu AlN i krzemu SiN oraz siarczki magnezu MnS. Przy wytwarzaniu blach o wysokiej indukcji z reguły stosuje się inhibitor złożony z dwóch podstawowych faz, a mianowicie AlN + MnS, MnSe + Sb, ewentualnie Mo, BN + MnS. Do każdego typu inhibitora dobrany jest odpowiedni proces technologiczny, zapewniający uzyskanie optymalnych właściwości gotowego wyrobu.



**Rys. 2. Schemat produkcji blach o ziarnach zorientowanych.**

Źródło: opracowanie własne na podstawie [12]

Blachy Hi-B wytwarzane są metodą jednoetapowego walcowania na zimno z wykorzystaniem  $\text{AlN}$  jako inhibitora dla rekryształizacji wtórnej, redukcja grubości podczas walcowania przekracza 85% [8, 13]. Zasadnicze znaczenie dla procesu produkcyjnego ma zapewnienie istnienia  $\text{AlN}$  w postaci drobno rozproszonej fazy wydzielonej na każdym etapie procesu metalurgicznego od przetapiania stopu wyjściowego do wyżarzania po walcowaniu na gorąco. Kluczowe jest utrzymywanie występowania pewnego poziomu objętościowej fazy austenitu, aby umożliwić rozpuszczenie  $\text{AlN}$  podczas fazy wygrzewania i wytrącenie dużej ilości drobnych cząstek  $\text{AlN}$  na etapie schładzania podczas wygrzewania po walcowaniu na gorąco. Konsekwencją tego jest fakt, że zawartość węgla i poziom temperatury podczas obróbki kończącej walcowanie na gorąco mają istotne znaczenie w procesie wytwarzania blach Hi-B.

Technologia produkcji RG-H opracowana przez firmę Kawasaki różni się od technologii konwencjonalnej wprowadzeniem w charakterze inhibitora uzupełniającego

cego dodatku Sb, który co prawda nie występuje w postaci wydzieleni obcej fazy, ale gromadząc się w roztworze stałym przy granicach ziaren utrudnia ich migrację, wspomagając w ten sposób działanie głównego inhibitora MnS lub Se. Ponadto wprowadzono modyfikację warunków wyżarzania, w wyniku której rekryształizacja wtórna zachodzi przy stałej i możliwie niskiej temperaturze, dając optymalne zorientowanie ziaren.

Specyfika technologii opracowanej przez firmę Allegheny Ludlum przy współpracy z ośrodkami badawczymi firmy General Electric polega na tym, że stal, oprócz tradycyjnie stosowanych składników, zawiera także miedź w ilości od 0,1 do 0,5% oraz bor w ilości 5...25 ppm. Proces hamowania normalnego rozrostu ziaren zachodzi natomiast zarówno w wyniku działania drobno dyspersyjnych związków obcej fazy, jak i w wyniku działania atomów znajdujących się w roztworze stałym – głównie siarki i selenu oraz azotu – które koncentrują w granicach ziaren. Wyżarzanie przelotowe przeprowadza się w stosunkowo wysokiej temperaturze, lecz w odróżnieniu od technologii Hi-B firmy Nippon Steel nie trzeba stosować przyspieszonego studzenia, co przypisuje się działaniu zawartej w stali miedzi. Końcowe walcowanie na zimno przeprowadza się, stosując gniot przekraczający 80%. Nowe technologie przewidują również stosowanie pewnych domieszek (np. siarki, azotu, boru) do tlenku magnezu nakładanego na blachy przed wysokotemperaturowym wyżarzaniem. Ma to na celu uzupełnienie zawartości inhibitorów w stali drogą dyfuzji lub zapobieganie ich zbyt wczesnemu usunięciu z materiału w czasie wyżarzania. Podstawowe różnice między technologiami ARMCO (blachy CGO), Hi-B Nippon Steel oraz RG-H Kawasaki przedstawia w syntetyczny sposób tabela 1.

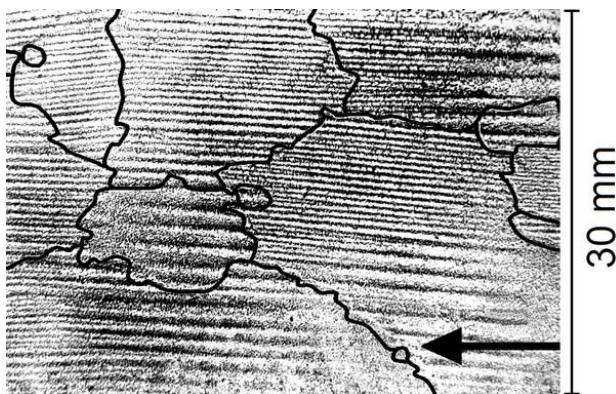
**TABELA 1**

Główne etapy produkcji blach konwencjonalnych, Hi-B i RG-H. Źródło: opracowanie własne na podstawie [16]

ARMCO (CGO)	Hi-B Nippon Steel	RG-H Kawasaki
produkcja stali (Mn, S lub Se)	produkcja stali (Al, N, Mn, S, Sn)	produkcja stali (Mn, S lub Se, Sb)
walcowanie na gorąco, wygrzewanie słabów T > 1300°C	walcowanie na gorąco, wygrzewanie słabów T > 1300 °C	walcowanie na gorąco, wygrzewanie słabów T > 1300°C
wyżarzanie normalizujące	wyżarzanie w wysokiej temperaturze	wyżarzanie normalizujące
wstępne walcowanie na zimno	ciężkie walcowanie na zimno, redukcja 87%	wstępne walcowanie na zimno
wyżarzanie pośrednie		wyżarzanie pośrednie
drugie walcowanie na zimno, redukcja 50%		drugie walcowanie na zimno, redukcja 65%
odwęglanie	odwęglanie	odwęglanie
końcowe wyżarzanie	końcowe wyżarzanie	końcowe wyżarzanie
termiczna obróbka wyrównawcza, nakładanie powłoki	termiczna obróbka wyrównawcza, nakładanie powłoki	termiczna obróbka wyrównawcza, nakładanie powłoki

Oprócz fazy rekrytalizacji wtórnej, istotny wpływ na końcowe właściwości gotowej blachy elektrotechnicznej ma proces pokrywania powierzchni blachy tlenkową warstwą izolacyjną [15]. Wpływ naprężeń wprowadzanych przez pokrycia izolacyjne na właściwości magnetyczne blach był przedmiotem badań m.in. w pracy [17]. Należy stwierdzić, że kluczowym problemem, który ogranicza osiągnięcie przez blachy GO minimalnych stratności, jest obecność w materiale wewnętrznych naprężeń [18]. Źródłem wewnętrznych naprężeń są domieszki, proces walcowania na zimno i pokrywania powierzchni blach warstwą izolacyjną, która indukuje naprężenia szczątkowe i odkształcenia. Przykładowo, użycie pokrycia fosforanowego skutkuje pojawieniem się wewnętrznych naprężeń rzędu 1,2 MPa w kierunku walcowania, co powoduje problemy takie jak podwyższenie stratności i występowanie magnetostrykcji. Celem obróbki laserowej powierzchni jest zredukowanie niekorzystnych wewnętrznych naprężeń i wprowadzenie korzystnych naprężeń, które wpłyną na rozdrobnienie domen magnetycznych w materiale. Jeżeli naprężenie jest rozciągające, może ono zmniejszyć stratność blachy. Z kolei, jeżeli naprężenie ma charakter ściskający, ma ono tendencję do zwiększania stratności materiału.

Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie powierzchni blachy GO bez naniesionej powłoki ochronnej. Wyraźnie widoczne są granice ziaren. Strzałka pokazuje kierunek walcowania blachy.



**Rys. 3. Zdjęcie powierzchni blachy GO.**  
Źródło: Wikimedia Commons, autor St. Żurek

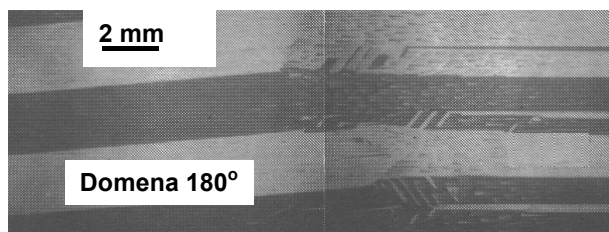
### 3. OPERACJE DOSKONALENIA STRUKTURY DOMENOWEJ

---

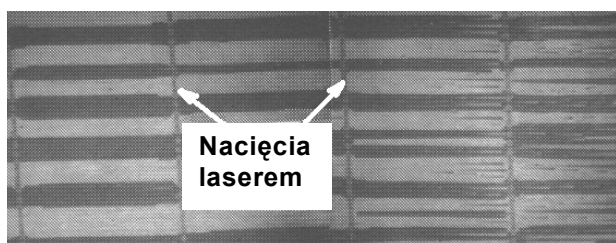
W celu poprawy właściwości magnetycznych blach o ziarnach zorientowanych opracowano szereg technologii, określanych wspólnie mianem technik doskonalenia struktury domenowej (ang. *domain refinement techniques*). Ogólnie metody te mają na celu odkształcenie istniejącego pola naprężeń w materiale w taki sposób, aby zmniejszyć stratność blachy. Najczęściej cel ten osiąga się poprzez regularne zarysowanie powierzchni

blachy w kierunku poprzecznym do kierunku walcowania. Można wyróżnić technologie oparte na obróbce mechanicznej (żłobkowanie lub tzw. kulowanie) [15, 19], obróbce iskrowej [12, 20], wykorzystaniu płomienia plazmy [12], napromieniowaniu jonami, oraz najczęściej stosowane w praktyce przemysłowej metody oparte na wykorzystaniu laserów Nd-YAG i CO<sub>2</sub> [12, 18, 21-29] – por. rysunek 4.

a)

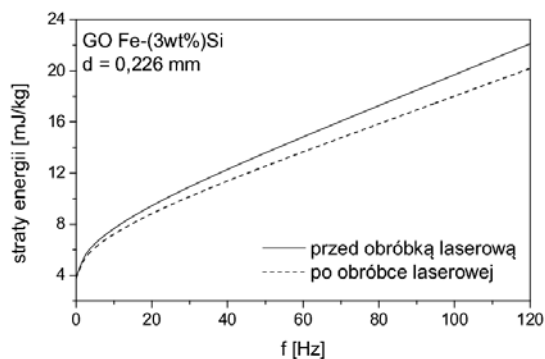


b)



**Rys. 4. Wpływ obróbki laserowej na szerokość ścian domenowych w blasze GO:** a) powierzchnia blachy przed obróbką, b) powierzchnia blachy po obróbce. Źródło opracowanie własne według [5, 12]

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe charakterystyki magnesowania (zależność energii przypadającej na cykl magnesowania w funkcji częstotliwości) dla blachy o ziarnach zorientowanych poddanej obróbce laserowej powierzchni i nie poddanej tego typu obróbce.



**Rys. 5. Straty energii podczas przemagnesowania w blasze GO przed i po procesie laserowej obróbki powierzchni.** Źródło: opracowanie własne na podstawie [28].

Zmniejszenie stratności w materiale poddanym obróbce laserowej tłumaczy się lepszym uporządkowaniem struktury domenowej. Blachy GO charakteryzują się dużym rozmiarem ziarna



(por. rys. 3), z czego wynika duży rozmiar domen magnetycznych. Jeśli ograniczy się rozmiar domen, mniej energii będzie traconej podczas okresowego ruchu ścian domenowych w trakcie cyklicznego przemagnesowania. W materiale poddanym obróbce laserowej zachodzi lokalne przegrzanie struktury przy powierzchni. Nagłe odkształcenie powierzchni powoduje powstanie fali dylatacyjnej, która odkształca rozkład naprężeń w głębi materiału i przyczynia się do powstawania nowych ścian domenowych [18].

Należy podkreślić, że wykorzystanie lasera do obróbki powierzchniowej nie stanowi uniwersalnego środka gwarantującego obniżenie stratności. Najczęściej odnotowuje się obniżenie stratności rzędu 10-18% [18, 22], ale w niektórych przypadkach zaobserwowano przyrost stratności w blaszce po obróbce laserowej [22, 26]. Można oczekiwać, że w najbliższej przyszłości w wielu ośrodkach przemysłowych będą prowadzone intensywne badania w celu dokładnego poznania fizyki procesu i jego optymalizacji.

#### 4. TRENDY ROZWOJOWE W TECHNOLOGII BLACH TRANSFORMATOROWYCH

Na rysunku 6 przedstawiono obecne trendy rozwojowe i wyzwania stojące przed producentami blach o ziarnach zorientowanych. Warto zwrócić uwagę na wzrastające znaczenie technologii cienkoslabowej, wdrażanej m.in. w zakładach należących do grupy Thyssen Krupp [14].

wymagania ekonomiczne i ekologiczne	obniżenie poziomu hałasu	wzrastające zużycie energii	oszczędność energii i zasobów naturalnych / ograniczenie emisji gazów cieplarnianych		
			dzięki użyciu GO	podczas produkcji GO	
odpowiedź producentów stali elektrot.	niższa magnetystrykcja	więcej GO	niższa stratność	ograniczenie czasu i temperatury obróbki	mniej etapów technologicznych
wyzwanie	zastąpienie CGO przez HGO + zwiększenie produkcji HGO + poprawa właściwości HGO		nowe gatunki stali		technologie przyszłości
	wyzarzanie grubych slabów w niższej temperaturze (1400 → 1150 °C)				
	technologia cienkoslabowa "GO-TS"				
					bezpśrednie odlewanie pasm ciągłe wyzarczanie

**Rys. 6. Wyzwania stojące przed producentami stali o ziarnach zorientowanych.**

Źródło: opracowanie własne według [1]

W tabelach 2-4 przedstawiono w sposób poglądowy opis właściwości magnetycznych wybranych blach o ziarnach zorientowanych. Dane podane w tabeli 2 dotyczą blach produkowanych przez krajowego producenta, firmę Stalprodukt S.A. z Bochni.

**TABELA 2**

Właściwości blach o ziarnach zorientowanych produkowanych przez firmę Stalprodukt S.A. Źródło: opracowanie własne wg [30]

grubość	oznaczenie handlowe	oznaczenie wg normy EN10107:2005	maks. stratność $B_m = 1,7 \text{ T}$ , $f = 50 \text{ Hz}$	typowa stratność $B_m = 1,7 \text{ T}$ , $f = 50 \text{ Hz}$	min. indukcja przy $H = 800 \text{ A/m}$	typowa indukcja przy $H = 800 \text{ A/m}$
[mm]			[W/kg]	[W/kg]	[T]	[T]
0,23	ET 110-23	M110-23S	1,10	1,08	1,84	1,87
	ET 120-23	M120-23S	1,20	1,14	1,84	1,87
0,27	ET 114-27		1,14	1,11	1,83	1,88
	ET 120-27	M120-27S	1,20	1,17	1,82	1,86
	ET 130-27	M130-27S	1,30	1,23	1,80	1,85
	ET 140-27	M140-27S	1,40	1,34	1,77	1,84
0,30	ET 117-30		1,17	1,15	1,85	1,88
	ET 122-30		1,22	1,19	1,83	1,87
	ET 130-30	M130-30S	1,30	1,25	1,82	1,86
	ET 140-30	M140-30S	1,40	1,34	1,80	1,84
	ET 150-30	M150-30S	1,50	1,44	1,75	1,81
0,35	ET 130-35		1,30	1,27	1,84	1,87
	ET 140-35	M140-35S	1,40	1,34	1,83	1,86
	ET 150-35	M150-35S	1,50	1,44	1,80	1,84
	ET 165-35	M165-35S	1,60	1,55	1,75	1,78

**TABELA 3**

Właściwości blach GO produkowanych przez firmę Nippon Steel.  
Źródło: opracowanie własne według [31]

oznaczenie handlowe	grubość [mm]	gatunek	maksymalna stratność przy $B_m = 1,7$ T		min. indukcja przy $H = 800$ A/m
			przy $f = 50$ Hz	przy $f = 60$ Hz	[T]
ORIENTCORE Hi-B	0,23	23ZH90	0,90	1,19	1,88
		23ZH95	0,95	1,25	1,88
		23ZH100	1,00	1,32	1,88
ORIENTCORE		23Z110	1,10	1,45	1,80
ORIENTCORE Hi-B	0,27	27ZH95	0,95	1,25	1,88
		27ZH100	1,00	1,32	1,88
		27ZH110	1,10	1,45	1,88
ORIENTCORE		27Z120	1,20	1,58	1,80
		27Z130	1,30	1,72	1,80
ORIENTCORE Hi-B	0,30	30ZH100	1,00	1,32	1,88
		30ZH105	1,05	1,39	1,88
		30ZH110	1,10	1,45	1,88
		30ZH120	1,20	1,58	1,88
		30Z120	1,20	1,58	1,80
ORIENTCORE		30Z130	1,30	1,72	1,80
		30Z140	1,40	1,85	1,80
ORIENTCORE Hi-B	0,35	35ZH115	1,15	1,52	1,88
		35ZH125	1,25	1,65	1,88
		35ZH135	1,35	1,78	1,88
		35Z135	1,35	1,78	1,80
ORIENTCORE		35Z145	1,45	1,91	1,80
		35Z155	1,55	2,04	1,80

**TABELA 4**

Właściwości blach o ziarnach zorientowanych, podwyższonej przenikalności magnetycznej, poddanych laserowej obróbce powierzchni. Źródło: opracowanie własne według [31]

grubość [mm]	oznaczenie handlowe	maksymalna stratność przy $B_m = 1,7$ T, [W/kg]		min. indukcja przy $H = 800$ A/m [T]
		dla $f = 50$ Hz	dla $f = 60$ Hz	
0,23	23ZDKH90	0,90	1,19	1,88
0,27	27ZDKH95	0,95	1,25	1,88

Blachy produkowane przez Stalprodukt S.A. spełniają wymagania normy europejskiej EN 10107:2005. Producent może określić dodatkowo (na życzenie odbiorcy) maksymalną wartość stratności blach przy  $B_m = 1,5$  T i  $f = 50$  Hz. Jako stratność zwyczajowo rozumie się w inżynierii materiałów magnetycznych wielkość strat energii rozpraszanej podczas cyklicznego przemagnesowania, przypadającą na jeden cykl i odniesioną na jednostkę masy lub objętości materiału. Stratność wyraża się w W/kg lub w  $W/m^3$ . Wartości stratności i indukcji mierzone są metodą Epsteina przy  $B_m = 1,7$  T i przy częstotliwości  $f = 50$  Hz na próbkach wyciętych wzdłuż kierunku walcowania, po wyżarzeniu odpężającym, po starzeniu w piecu przy temperaturze  $225^\circ\text{C}$  przez 24 godziny.

Dane podane w tabelach 3 i 4 dotyczą blach produkowanych przez japońskiego producenta Nippon Steel, produkującego blachy o podwyższonej przenikalności magnetycznej ORIENTCORE, w tym blachy Hi-B. Tabela 4 zawiera dane dotyczących blach ORIENTCORE Hi-B LS, tzn. blach, które zostały poddane obróbce laserowej. Właściwości blach Nippon Steel określone są zgodnie z japońskimi standardami przemysłowymi (JIS – Japanese Industrial Standards). Parametrem gwarantowanym jest wartość indukcji przy natężeniu pola  $H = 800$  A/m. Stratność określa się dla poziomu indukcji  $B_m = 1,7$  T i przy częstotliwości  $f = 50$  Hz lub 60 Hz, co jest związane ze specyfiką japońskiego sektora energetycznego, w którym stosowane są obie wyżej wymienione częstotliwości sieciowe. Należy podkreślić, że wartość  $B_m = 1,7$  T wyznacza graniczną wartość indukcji znormalizowanego obszaru pomiarowego dla tego typu materiałów magnetycznie miękkich. Firma Nippon Steel eksportuje swoje produkty również na rynek amerykański, wówczas stosowane są warunki pomiaru zgodne ze specyfikacjami American Iron and Steel Institute (ASTM A34), które są zbliżone do standardu JIS C2550-1986. Dla blach produkowanych na rynek amerykański stosowane są ponadto ujednolicone oznaczenia gatunków blach, np. M-4.

Pomiarów właściwości blach poddanych obróbce laserowej powierzchni (tab. 4) dokonywano na prostokątnych próbkach wyciętych wzdłuż kierunku walcowania o wymiarach 800 mm x 600 mm z wykorzystaniem aparatu do pomiarów na pojedynczym arkuszu (Single Sheet Tester). Należy zwrócić uwagę na fakt, że blach o powierzchni poddanej obróbce laserowej nie należy stosować w rdzeniach zwijanych, które wymagają wyżarzania odpężającego, ponieważ dodatkowa obróbka termiczna niweczy pozytywne skutki obróbki laserowej. Blachy tego typu korzystnie jest stosować w dużych rdzeniach składanych.

## 5. PODSUMOWANIE

---

Konwencjonalne materiały krystaliczne, w tym blachy o ziarnach zorientowanych, utrzymują swoją znaczącą pozycję we współczesnej inżynierii materiałów magnetycznych stosowanych w elektrotechnice. W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące tej klasy materiałów magnetycznych, stosowane obecnie technologie i obserwowane światowe trendy rozwojowe. Podano ponadto orientacyjne dane katalogowe dla wybranych gatunków blach.

### LITERATURA

1. Davies H. A., Fiorillo F., Flohrer S., Guenther H., Hasegawa R., Sievert J., Varga L. K., Yamaguchi M.: Challenges in optimizing the magnetic properties of bulk soft magnetic materials, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2008, vol. 320, pp. 2411-2422.
2. Korzunin G. S.: The modern status of inspection of certain magnetic characteristics of anisotropic electrical steel (review), *Rus. J. Nondestr. Test.*, 2005, vol. 41, pp. 640-665, translated from *Defektoskopiya* 2005, vol. 41, pp. 23-57.
3. Materiały informacyjne firmy Stalprodukt S. A. – raport roczny 2013 pt. Wartości na stałe wpisane w działanie.
4. Groyecki J.: Blachy elektrotechniczne i ich produkcja w Polsce, *Przeł. Elektrot.* 2003, vol. 3, pp. 177-180.
5. Najgebauer M., Chwastek K., Szczygłowski J., Wilczyński W.: Research and development of electrical steel sheets – in the world and Poland, Technical and economic aspect of modern technology transfer in context of integration with European Union vol. II, Szczygłowski J., Kolcun M. (Eds.), pp. 224 – 229, Mercury-Smekal Publishing House, Košice 2004.
6. Szczygłowski J.: Nowoczesne materiały magnetycznie miękkie. Wybrane właściwości. Seria Monografie nr 269, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.
7. Szczygłowski J.: Modelowanie obwodu magnetycznego o jednorodnej i niejednorodnej strukturze materiałowej, seria Monografie nr 80, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
8. Kubota T., Fujikura M., Ushigami Y.: Recent progress and future trend on grain-oriented silicon steel (invited paper), *J. Magn. Magn. Mater.*, 2000, vol. 215-216, pp. 69-73.
9. Morito N., Komatsubara M., Shimizu Y.: History and recent development of Grain Oriented Electrical Steel at Kawasaki Steel, *Kawasaki Steel Technical Report*, 1998, vol. 39, pp. 3-12.
10. Fiorillo F., Bertotti G., Appino C., Pasquale M.: Soft magnetic materials, entry in: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Volume 19, J. G. Webster (Ed.), pp. 425-445, J. Wiley & Sons 1999.
11. Eadie G. C.: Grain-oriented electrotechnical steel: a system (invited paper), *J. Magn. Magn. Mater.*, 1984, vol. 41, pp. 1-6.

12. Moses A. J.: Electrical steels: past, present and future developments, IEE Proc. A., 1990, vol. 137, pp. 233-245.
13. Groyecki J.: Rozwój technologii blach transformatorowych, Wiad. Elektrot., 1981, vol. 6, pp. 145-149.
14. Günther K., Abbruzese G., Fortunati S., Ligi G.: Recent technology developments in the production of grain oriented electrical steel, Proc. SMM 16 vol.1, (Ed. D. Raabe), pp. 41-50, Düsseldorf 2004.
15. Foster K., Littman M. F.: Factors affecting core losses in oriented electrical steels at moderate inductions (invited), J. Appl. Phys., 1985, vol. 57 (1), pp. 4203-4208.
16. Takahashi N., Suga Y., Kobayashi H.: Recent developments in grain-oriented silicon steel (invited paper), J. Magn. Magn. Mater., 1996, vol. 160, pp. 98-101.
17. Cho S.-S., Kim S.-B., Soh J.-Y., Han S.-O.: Effect of tension coating on iron losses at frequencies below 1 kHz in thin-gauged 3% Si-Fe sheets, IEEE Trans. Magn., 2009, vol. 45 (10), pp. 4165-4168.
18. Ponnaluri S. V., Cherukuri R., Molian P. A.: Core loss reduction in grain-oriented silicon steels by excimer laser scribing. Part I: experimental work, J. Mater. Process. Tech., 2001, vol. 112, pp. 199-204.
19. Beckley P., Snell D.: Low-cost, high-speed domain refinement without damage to insulative coatings, J. Mater. Eng. Perf., 1994, vol. 3 (2), 209-213.
20. Beckley P., Snell D., Lockhart C.: Domain control by spark ablation, J. Appl. Phys., 1985, vol. 57 (1), pp. 4212-4213.
21. Barradi T.: Effects of laser processing on domain wall motion in grain-oriented silicon steel, Textur. Microstruct., 1989, vol. 11, pp. 219-229.
22. Verbrugge B., Jiles D. C.: Core loss reduction in electrical steels through materials processing, J. Appl. Phys., 1999, vol. 85 (8), pp. 4895-4897.
23. Dragoshanskiĭ Yu. N., Gubernatorov V. V., Sokolov B. K., Ovchinnikov V. V.: Structural inhomogeneity and magnetic properties of soft magnetic materials, Dokl. Phys., 2002, vol. 47, pp. 302-304.
24. Dragoshanskiĭ Yu. N., Sokolov B. K., Pudov V. I., Reutov Yu. Ya., Tiunov V. F., Gubernatorov V. V.: Improvement of the properties of anisotropic soft magnetic materials by laser treatment and monitoring of its efficiency, Dokl. Phys., 2003, vol. 48, pp. 340-342.
25. Ushigami Y., Mizokami M., Fujikura M., Kubota T., Fujii H., Murakami K.: Recent development of low-loss grain-oriented silicon steel, J. Magn. Magn. Mater., 2003, vol. 254-255, pp. 307-314.
26. Arai S., Fujikura M., Ushigami Y.: Overview of domain refinement technology in grain oriented electrical steel sheets, Proc. SMM 16 vol. 1 (Ed. D. Raabe), pp. 379-383, Düsseldorf 2004.
27. Bán G., Songini G., Abbruzzese G.: New method for improving magnetic characteristics of Grain-Oriented electrical steel by laser scribing, Proc. SMM 16 vol. 1 (Ed. D. Raabe), pp. 385-390, Düsseldorf 2004.
28. Weidenfeller B., Riehemann W.: Polarization-dependent fractional loss improvement of laser scribed GO FeSi steels, J. Magn. Magn. Mater., 2008, vol. 320, e661-e664.
29. Fiorillo F.: Magnetic losses in crystalline and amorphous laminations, vol. I Travaux du deuxième atelier scientifique franco-canado-roumain "Matériaux pour l'Electrotechnique" 15-19.05.1999, Bucarest, 1F-14F.

30. Blachy i taśmy elektrotechniczne i rdzenie transformatorowe – katalog Stalprodukt S.A., Bochnia 2007.
31. ORIENTCORE, ORIENTCORE Hi-B, ORIENTCORE Hi-B LS, Grain-oriented electrical steel sheets – katalog Nippon Steel Corp., Tokyo 1988.

*Rękopis dostarczono dnia 30.10.2014 r.*

## GRAIN-ORIENTED STEELS FOR USE IN ELECTRICAL ENGINEERING – CHOSEN ISSUES

Artur WODZYŃSKI,  
Maciej SULIGA, Krzysztof CHWASTEK

**ABSTRACT** *Grain-oriented steels are an important group of magnetic materials used in electrical engineering, most often in the magnetic circuits of transformers. The paper presents chosen issues concerning optimization of the technological process of their production, methods aimed at domain structure refinement and worldwide trends of their development.*

**Keywords:** *soft magnetic materials, transformers steel, processing technology, domain refinement techniques*