

Badanie wybranych własności blach elektrotechnicznych

Streszczenie. Nieorientowane blachy krzemowe są podstawowym materiałem do produkcji elementów maszyn i urządzeń elektrotechnicznych, takich jak silniki. Sprawność silnika jest zależna od jakości użytego materiału oraz od jakości wykonania elementów składających się na wirnik i stojan. Pakiety tworzące wirnik zbudowane są z wykończonego otrzymanych w procesie wykrawania. O dokładności wykrawania decydują parametry procesu oraz własności blachy. W pracy poddano badaniom cztery blachy elektrotechniczne M600-50A dostarczone od różnych producentów. Otrzymany materiał poddano badaniom metalograficznym i mechanicznym, w tym określono wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie i twardość. Otrzymane wyniki poddano ocenie statystycznej.

Abstract. Non-oriented silicon blanks (electrotechnical steel blanks) are the basic material for the production of machinery and electrical equipment, such as electrical engines. The efficiency of this kind of motor depends on the quality of the material used and the quality of the elements for the rotor and stator. Blanks gathered in form of a stack creating the rotor are made from stampings obtained by the punching. The accuracy of punching determine the process parameters and properties of sheet. In this article four electrical sheets M600-50A supplied by different manufacturers were analyzed. The material obtained was subjected to metallographic examination and mechanical tests including the tensile strength, elongation and hardness. Finally, the results were evaluated statistically. *Investigations of some properties of non-oriented electrical steel*

Słowa kluczowe: blachy elektrotechniczne, obwód magnetyczny, wirnik

Keywords: electrical steel, magnetic circuit, rotor

Wstęp

Sprawność silnika elektrycznego, moc maksymalna, ciągła jest zależna między innymi od takich czynników jak straty w uzwojeniu stojana, straty ciepłe, straty generowane przez niewłaściwy montaż, jak również straty pochodzące od prądów wirowych i związane z koniecznością silniejszego przemagnesowywania. Obecnie ocenia się, że ok. 5% energii elektrycznej w Europie są to straty generowane w rdzeniach z materiałów magnetycznie miękkich [1]. Wzrost zainteresowania silnikami o wysokiej sprawności klasy Super lub Premium zmusza producentów do wprowadzania licznych zmian znacząco obniżających sumaryczne straty, w tym zapobiegających tworzeniu się mostków pomiędzy blachami tworzącymi pakiet wirnika, stojana lub transformatora. Powstawanie takich mostków jest, między innymi, następstwem tworzenia się zadziorów w procesie wykrawania elementów pakietu [2].

Tworzenie się zadziora i jego wielkość zależy od parametrów procesu wykrawania oraz własności mechanicznych blach elektrotechnicznych, z których wycinane są elementy. Normy określają własności magnetyczne i elektryczne blach elektrotechnicznych [3], ale nie określają ich własności mechanicznych. Producenci blach jeśli już podają w specyfikacjach własności mechaniczne swoich blach, to zazwyczaj są one szacunkowe i obejmują bardzo szeroki zakres wartości, stąd też znacząco utrudnione jest modelowanie oraz opracowywanie zaleceń dla takiego procesu [4].

W artykule przeprowadzono badania i przedstawiono porównawczo uzyskane wyniki dla blachy elektrotechnicznej M600-50A pochodzącej od czterech różnych dostawców.

Pogarszanie właściwości magnetycznych i elektrycznych w procesach wytwarzania pakietów

Ocena właściwości blach elektrotechnicznych jest oceną w skali makro. Przekształcanie wielkoformatowych blach w pakiety magnetyczne rdzeni: do transformatorów i silników wiąże się najczęściej z procesami wykrawania mechanicznego skomplikowanych profili o niewielkich wymiarach powodujących duże naprężenia w pobliżu linii cięcia. Szczególnie w przypadku profili do silników obszar który podlegał wysokim naprężeniom stanowi znaczną część powierzchni kształtek. W największym stopniu dotyczy to zębów o małych szerokościach. W strefach zdeformowanych, a więc w pobliżu linii wykroju wzrastają straty histerezy. Wpływ na straty histerezy mają

również styczne naprężenia mechaniczne wywołane przez ściskanie podczas pakietowania rdzeni. [5]. Zjawisko to jest tym silniejsze im bardziej odkształcona jest kształtka. Wycinanie wykrojnikami powoduje kruszenie materiału szczególnie w obszarach o podwyższonej twardości. Jest to powodem powstania postrzępionej linii wycinania i szybkiego punktowego niszczenia wykrojników. Efektem tego jest poszerzenie zdeformowanej strefy brzegowej w wycinanym profilu. Ubytki w krawędzi profilu powodują wzrost średniej szerokości szczeliny powietrznej i jednocześnie wzrost natężenia pola magnetycznego w sąsiednich obszarach. To zjawisko również generuje wzrost strat elektrycznych. Zadziory powstałe w procesie wykrawania są obszarami które ulegają największym zmianom właściwości ze względu na działanie największych naprężeń. Deformacji podlegają ziarna. Zadziory przyczyniają się do przebić izolacji między kształtkami, dodatkowych odkształceń w trakcie pakietowania.

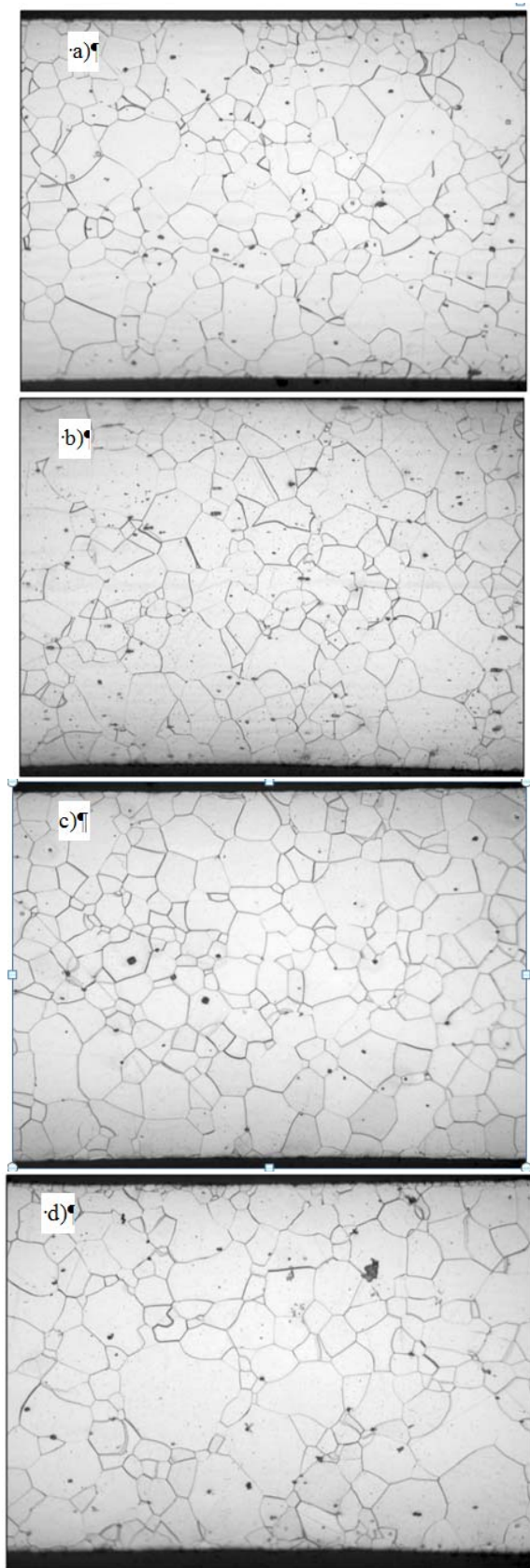
Badania własności mechanicznych blach elektrotechnicznych

Badania własności blach elektrotechnicznych przeprowadzono dla wyrobów czterech producentów powszechnie dostępnych na rynku. Blachy są produkowane zgodnie z normą PN-EN 10106:2016-01. Wszystkie badane blachy były wykonane w klasie M600-50A. Badaniom poddano próbki wycięte z blach o grubości 0,5 mm. Próby rozciągania blach wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010.

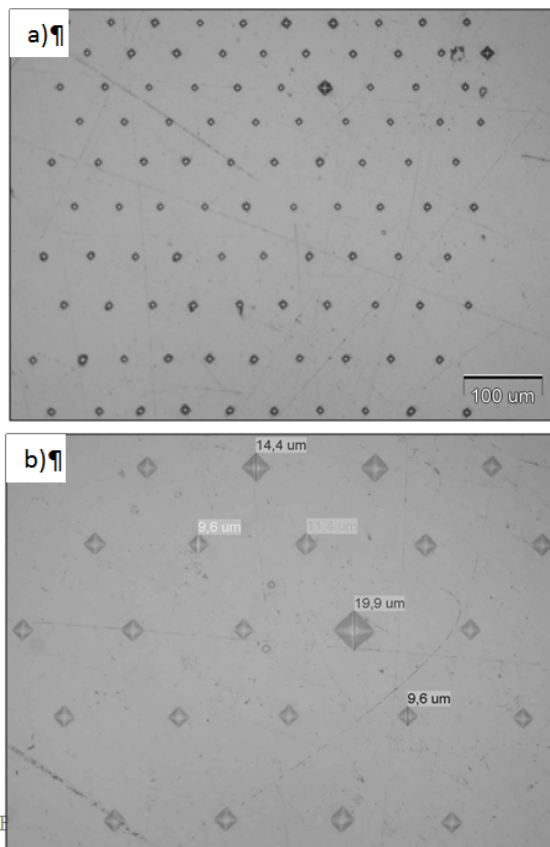
Badania metalograficzne

Do badań metalograficznych pobrano próbki pozwalające na obserwację struktury w przekroju poprzecznym (na grubości) blachy. Odpowiednio wycięte próbki poddano przygotowaniu polegającym na polerowaniu i trawieniu. Po ostatecznym polerowaniu próbek, wykonanym na polerkach Struers, powierzchnie zglądów, w celu ujawnienia granic ziaren, wytrawiono Nitaliem 10%. Przygotowane zglądy metalograficzne poddano badaniom z wykorzystaniem mikroskopu Olympus X1, a analizę struktur (obrazów) wykonano z użyciem oprogramowania Image.Analysis. Na zarejestrowanych zdjęciach nie zaobserwowano różnic w strukturach badanych blach elektrotechnicznych. Zdjęcia metalograficzne wykonano przy powiększeniach x50, x100, x200 i x500. Przykładowe zdjęcia struktur blach elektrotechnicznych, pochodzących

od wszystkich czterech dostawców, wykonane w powiększeniu x200, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zgłady metalograficzne czterech różnych blach, zdjęcia wykonano przy powiększeniu x200: a) blacha od producenta 1, b) blacha od producenta 2, c) blacha od producenta 3, d) blacha od producenta 4



Rys. 2. Fragment mapy pomiarów twardości Vickersa dla blachy od dostawcy 1: a) na powierzchni badanej blachy, pow. x200; b) przykład zwiromiarowanych odcisków, pow. x500

Pomiary twardość badanych blach

Pomiary twardości wykonano na mikroskopie Leitz Wetzlar (MiniLoad) przystosowanym do pomiarów mikrotwardości HV w zakresie obciążeń od 10 do 1000 μN . Zgodnie z normą ASTM E-92 twardość blachy o grubości 0,5 mm, dla której przewidywana wartość twardości wynosi około 150 HV powinna być mierzona przy obciążeniu maksymalnym wynoszącym 100 μN . Wybrane obrazy powierzchni badanej blachy przedstawiono na rysunku 2.

Z przeprowadzonych badań twardości wykonano mapy rozkładu twardości oraz zbudowano bazę danych do analiz statystycznych. Przykładową mapę rozkładu twardości dla blachy od producenta 2 przedstawiono na rysunku 3.

Sumaryczne wyniki wszystkich pomiarów wykonanych dla czterech różnych blach zestawiono w Tabeli 1. Statystyczną analizę otrzymanych wyników przedstawiono w rozdziale 3.

103	135	102	137	128	168	137	126	103	147
178	126	128	137	153	178	126	137	110	135
122	75	110	153	153	128	133	108	124	119
142	128	91	117	135	142	110	117	153	126
135	128	97	161	131	165	110	140	128	133
150	165	131	161	153	158	135	153	95	137
108	88	120	128	117	174	115	126	128	119
137	140	156	135	140	165	147	150	128	110
145	145	137	110	147	100	120	153	128	119
153	153	102	165	150	150	185	108	133	126

Rys. 3. Mapa rozkładu twardości μHV dla blachy producenta 2

Tabela 1 Sumaryczne wyniki pomiarów twardości badanych blach

Lp	Oznaczenie dostawcy	Twardość średnia ¹	Odchylenie standardowe	Kwartyl 1	Mediana
1	Blacha 1	128,3	24,9	110,0	131,0
2	Blacha 2	133,1	21,1	119,3	134,0
3	Blacha 3	120,3	18,7	110,0	119,0
4	Blacha 4	123,9	20,3	110,0	124,0

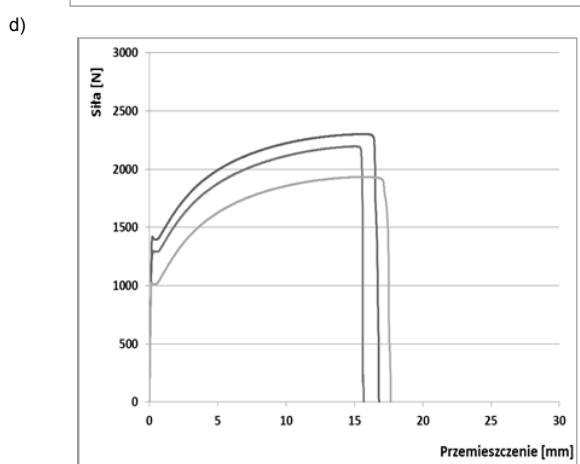
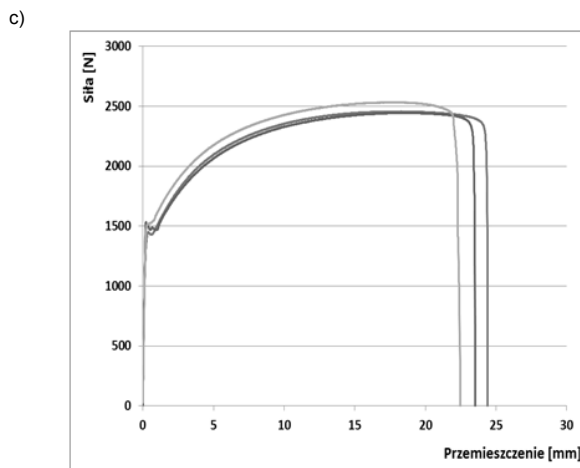
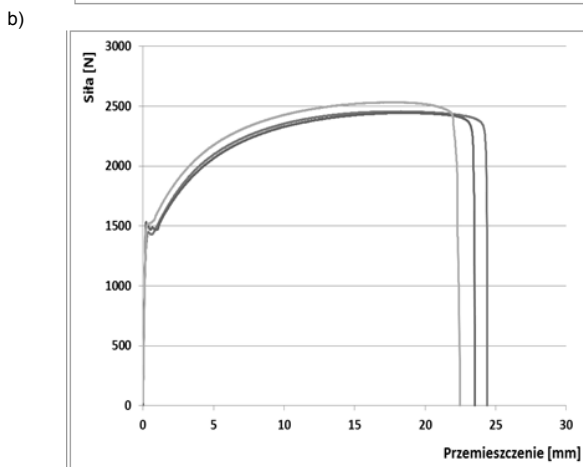
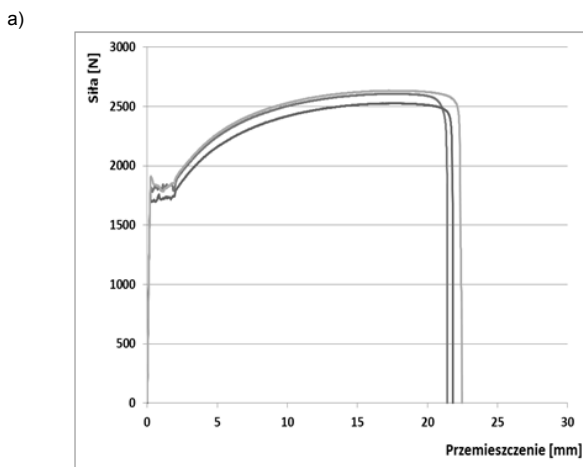
¹twardość średnia, kwartyl1 i mediana podane w [μ HV]

Wytrzymałość na rozciąganie

Badania własności obejmowały wykonanie badań wytrzymałości na rozciąganie w próbie jednoosiowego rozciągania próbek płaskich. Do badania wykorzystano próbki wykonane zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2009. Badania wytrzymałości na rozciąganie zostały wykonane na maszynie wytrzymałościowej MTS Bionix, wyposażonej w czujniki siły i przemieszczenia oraz współpracującej z systemem rejestracji przebiegu siły i przemieszczenia.

W badaniach wytrzymałości na rozciąganie posłużono się każdorazowo 10-cioma próbkami. Z zarejestrowanych przebiegów wykonano przebiegi uśrednione. Na rysunku 4 przedstawiono po trzy typowe przebiegi zarejestrowane dla wszystkich badanych blach.

Na wykresach (rysunek 4) widoczne są różnice przebiegu zarejestrowanej siły zrywającej. Pomiedzy badanymi blachami największa procentowa różnica wielkości siły (dla wartości uśrednionych obliczonych dla 10-ciu pomiarów) wynosiła 17 %. Wynik ten dotyczył blach pochodzących od 1 i 4 producenta. Natomiast znacząco bardziej różniła się wielkość przemieszczenia dla badanych blach. W skrajnym przypadku, tj. dla blach pochodzących od dostawcy 3 i 4 różnica ta wynosiła blisko 37 %. Jest to o tyle istotny fakt, że znacząca różnica w ciągliwości materiału wpływa bezpośrednio na wielkość zadziora.



Rys. 4. Wykresy zarejestrowanych (uśrednionych z 10-ciu pomiarów) przebiegów siły w funkcji przemieszczenia dla blachy od a) dostawcy 1, b) dostawcy 2, c) dostawcy 3, d) dostawcy 4.

Analiza wyników

W analizie wyników przede wszystkim skoncentrowano się na pomiarach twardości, bowiem twardość, jest bezpośrednio związana z siłą wykrawania oraz ze zużyciem stępła w procesie wykrawania, co przedstawiono w [2]. Wzrost zużycia stępła bezpośrednio wpływa na pojawienie się i wzrost wielkości zadziora.

Na rysunku 5 przedstawiono histogramy rozkładu pomiaru twardości dla czterech blach. Rozkłady te istotnie różnią się, na co wskazywały wyliczone miary położenia i zróżnicowania rozkładu przedstawione w Tabeli 1.

Dla zgromadzonych pomiarów wykonano testy Shapiro – Wilka pozwalające na postawienie hipotez o zbieżności otrzymanych rozkładów z rozkładem normalnym. Wyliczono wartości statystyki W zgodnie ze wzorem:

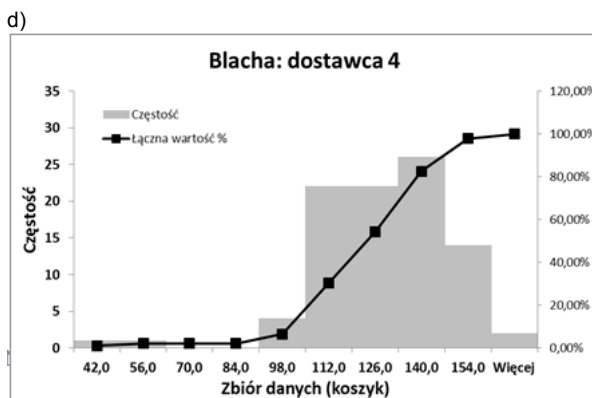
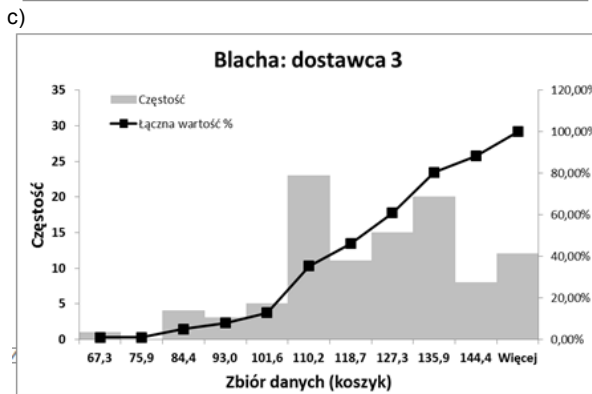
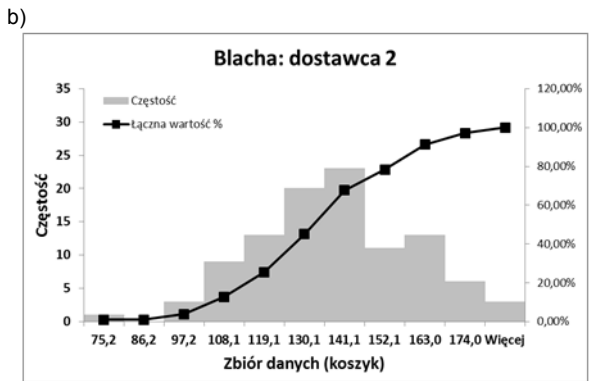
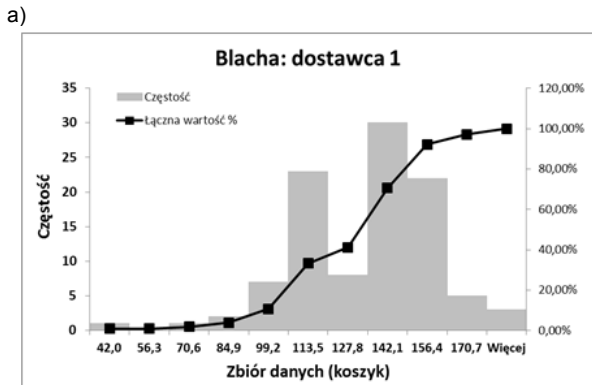
(Błąd! Nie podano nazwy zakładki.)

$W =$

$$\frac{|\sum_{i=1}^n a_i(n)(X_{n-i+1} - X_i)|^2}{\sum_{j=2}^n (X_j - \bar{X})^2}$$

gdzie: $(X_{n-i+1} - X_i)$ – różnica pomiędzy skrajnymi obserwacjami wyliczana dla kolejnych par malejąco, $(X_j - \bar{X})$ – różnica między kolejną obserwacją w próbie a wartością oczekiwaną, a_i – stała.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki wyliczonych wartości statystyki W. Jedyne rozkład twardości dla blachy dostawcy 2 pozwala na utrzymanie tezy normalności rozkładu. Dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ stabilizowana wartość krytyczna $W(\alpha, n)$ w pozostałych przypadkach przekracza wyliczoną wartość W, co oznacza, że są podstawy do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu badanych danych.



Rys. 5. Histogram rozkładu pomiarów twardości dla blach od dostawcy: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4

Tabela 2 Wartość statystyki W w testu Shapiro – Wilka

Lp	Oznaczenie dostawcy	Test Shapiro - Wilka	
		W	W _{kryt} ¹
1	Blacha 1	0,9698	0,9750
2	Blacha 2	0,9928	0,9750
3	Blacha 3	0,8871	0,9748
4	Blacha 4	0,9372	0,9727

¹ wartość W_{kryt} jest różna ze względu na różne wielkości prób

Ze względu na fakt, że powszechnie stosowany test Grubbsa, do wykrywania danych odstających, jest dedykowany próbom o rozkładzie normalnym (niepełnionym dla trzech dostawców blach) wykonano analizę z wykorzystaniem testu Hampela. Zakłada się, że statystyka Hampela jest odporna na dane odstające i nie bazuje na założeniu o rozkładzie normalnym.

Na rysunku 6 przedstawiono, wykonane dla wszystkich blach, wykresy pudełkowe typu skrzynka-wąsy (box-plot). Postawiono hipotezę o istotnych różnicach wartości oczekiwanej (średnia z pomiarów twardości) blach pochodzących od różnych dostawców oraz postawiono hipotezy alternatywne, że nie różnią się wartościami oczekiwanymi.

Ponieważ wykazano, że rozkłady pomiarów twardości nie są rozkładami normalnymi posłużono się modelem, stosowanym gdy:

- próby są niezależne i pochodzą z populacji o nieznanym rozkładzie,
- próby są dostatecznie duże $n \geq 100$,
- mają skończone wariancje σ .

Wówczas statystyka testowa opisana jest wzorem:

(Błąd! Nie podano nazwy zakładki.)
$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

gdzie: \bar{X}, \bar{Y} – wartości oczekiwane z prób.

Dla każdej pary blach postawiono hipotezę zerową i hipotezę alternatywną:

hipoteza zerowa $H: \bar{X} = \bar{Y}$,

hipoteza alternatywna $K: \bar{X} \neq \bar{Y}$,

gdzie hipotezy alternatywne dla par badanych blach:

dla dwóch prób: blacha 2 – blacha 1 hipoteza alternatywna

$K: \bar{X}_2 > \bar{X}_1$,

dla dwóch prób: blacha 2 – blacha 3 hipoteza alternatywna

$K: \bar{X}_2 > \bar{X}_3$,

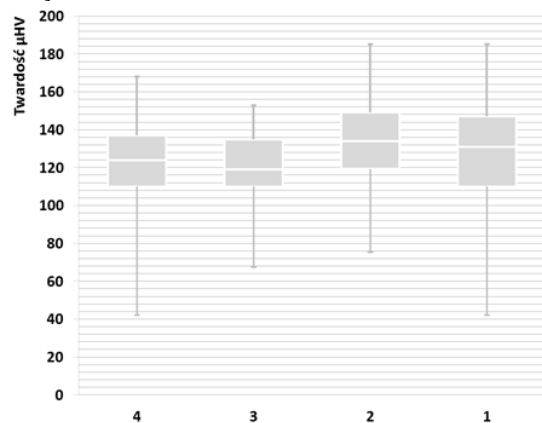
dla dwóch prób: blacha 2 – blacha 4 hipoteza alternatywna

$K: \bar{X}_2 > \bar{X}_4$,

dla dwóch prób: blacha 1 – blacha 4 hipoteza alternatywna

$K: \bar{X}_1 > \bar{X}_4$,

Dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ wyliczone statystyki pozwalają na utrzymanie hipotezy zerowej dla pierwszej i ostatniej pary: blacha 2 – blacha 1, blacha 1 – blacha 4 oraz odrzucenie hipotezy zerowej dla pozostałych dwóch przypadków: blacha 2 – blacha 3 i blacha 2 – blacha 4. Oznacza to, że pomiary twardości blachy pozwalają na odróżnienie blachy pochodzącej od dostawcy 2 od blach pochodzących od dostawców 3 i 4 oraz nie pozwalają na rozróżnienie od blachy pochodzącej od dostawcy 1. Równocześnie nie jest możliwe rozróżnienie blachy pochodzącej od dostawcy 1 od blachy pochodzącej od dostawcy 4.



Rys. 6. Wykres typu skrzynka-wąsy (box-plot) pomiarów twardości blachy

Podsumowanie

Dla prawidłowego doboru parametrów procesu wytwarzania kluczowe są własności wykorzystywanych materiałów w skali mikro i makro. Własności mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, czy twardość są powszechnie stosowanymi wielkościami będącymi parametrami odbioru materiału od dostawcy. W przypadku stali elektrotechnicznych wykorzystywanych w produkcji np. silników, transformatorów istotnymi parametrami są ich własności elektromagnetyczne. I to wyłącznie one są zazwyczaj stosowane do oceny jakości blach elektrotechnicznych. Stąd też mniejszą uwagę przykładają się do innych własności, w tym własności wytrzymałościowych. Jednakże stale rosnące wymagania stawiane urządzeniom elektrycznym sprawiają, że baczniejszą uwagę należy skierować na własności mechaniczne w makro i mikro skali także w przypadku tego rodzaju blach. Przy tych samych właściwościach wyznaczonych w skali makro dla całych blach różnice w strukturze mikro (rozrzut wielkości ziaren i ich właściwości) będą wpływały na właściwości gotowych pakietów rdzeni przy takich samych procesach wytwarzania. Spowodowane jest to istotnym wpływem stanu i własności blach na proces wykrawania. Przebieg procesu wykrawania ma bezpośredni wpływ na jakość wykrojki będącą elementem wykorzystywanym w produkcji wirników i stojanów.

Z przeprowadzonych badań wynika, że blachy elektrotechniczne M600-50A pochodzące od różnych producentów mają wyraźnie inne własności mechaniczne. W trakcie analiz wykazano, że różnice te są statystycznie istotne, zwłaszcza dla pomiarów twardości. Dalsze badania powinny być skierowane na ocenę możliwości wykorzystania także innych pomiarów mechanicznych do oceny jakości blach.

Podsumowując należy stwierdzić, że pojawia się potrzeba badania nie tylko własności elektromagnetycznych, ale także określenia własności

mechanicznych stosowanych blach elektrotechnicznych oraz opracowania kryteriów odbioru takich blach ze względu na istotny wpływ tych własności na przebieg procesu wykrawania – zużycie i trwałość narzędzi.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki jako projekt badawczy nr N N508 628 140.

Autorzy:

Piotr CZYŻEWSKI^a, Andrzej KOCHAŃSKI^a, Robert CACKO^b, Tadeusz MACIOŁEK^b

^a Instytut Techniki Wytwarzania, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska; ^b Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska

LITERATURA

- [1] Wilczyński W.: Wpływ technologii na właściwości magnetyczne rdzeni maszyn elektrycznych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 215/2003, (pp.6-187), Warszawa
- [2] Hamzehbahmani H, Anderson P, Hall J, Fox D. Eddy Current loss estimation of edge burr-affected magnetic laminations based on equivalent electrical network - Part I: Fundamental concepts and FEM modeling. *IEEE Trans Power Deliv.* 2014;29(2):642–50
- [3] PN-EN 10106:2009 Blachy i taśmy stalowe elektrotechniczne o ziarnie nieorientowanym walcowane na zimno, dostarczane w stanie w pełni przetworzonym
- [4] Czyżewski P., Kochański A., Moszczyński L.: Modelowanie parametrów procesu wykrawania dla różnych stanów zużycia stempla, *Przegląd Mechaniczny*, 2016, 5, 23-26
- [5] Sakaki Y, Imagi S.: Relationship among Eddy Current Loss, Frequency, Maximum Flux Density and a New Parameter Concerning the Number of Domain Walls in Polycrystalline and Amorphous Soft Magnetic Materials. *IEEE Trans Magn.* 1981;17(4):1478–80