

*metalurgia proszków, kleje,
dielektromagnetyki, dielektromagnesy*

Dariusz KAPELSKI*, Bartosz JANKOWSKI*, Marcin KARBOWIAK*,
Marek PRZYBYLSKI*, Patryk MACIEJEWSKI*, Barbara ŚLUSAREK*

HYBRYDOWE ELEMENTY OBWODU MAGNETYCZNEGO WYTWARZANE METODĄ KLEJENIA

Rozwój nowych technologii i materiałów daje projektantom silników elektrycznych coraz więcej możliwości tworzenia nowych konstrukcji maszyn elektrycznych. Zastosowanie proszkowych kompozytów magnetycznie miękkich i magnetycznie twardych pozwala na uzyskanie struktur niewykonalnych z blachy elektrotechnicznej. Metalurgia proszków umożliwia produkcję elementów o strukturze warstwowej – nazywanych elementami hybrydowymi. Takie elementy składają się z obszarów o różnych właściwościach fizycznych. Ograniczeniem technologii hybrydowej jest kształt uzyskiwanych elementów oraz temperatury utwardzania stosowanych materiałów. Dlatego w pewnych zastosowaniach nieuniknione jest stosowanie połączeń klejonych. Głównym celem prowadzonych badań jest porównanie właściwości mechanicznych elementów dwuwarstwowych: klejonych różnymi rodzajami klejów oraz elementów wykonanych w jednym procesie prasowania.

1. WPROWADZENIE

W klasycznych maszynach elektrycznych magnetycznie miękkie obwody wytwarzane są głównie z blachy elektrotechnicznej, a magnetycznie twarde elementy ze spiekanych magnesów ferrytowych lub spiekanych magnesów zawierających pierwiastki ziem rzadkich. Takie magnesy trwale umieszcza się na powierzchni lub wewnątrz wirujących części obwodu magnetycznego. Metalurgia proszków oferuje projektantom nowe rozwiązania. Jest to możliwość wytwarzania kompozytów magnetycznie miękkich i magnetycznie twardych. Technologia ta polega na spajaniu ziaren magnetycznych tworzywem wiążącym. Dzięki możliwości domieszkowania kompozytów innymi materiałami możliwe jest dostosowanie właściwości fizycznych, do potrzeb danej aplikacji. Metalurgia proszków umożliwia produkcję elementów o strukturze warstwowej – nazywanej strukturą hybrydową. Takie elementy

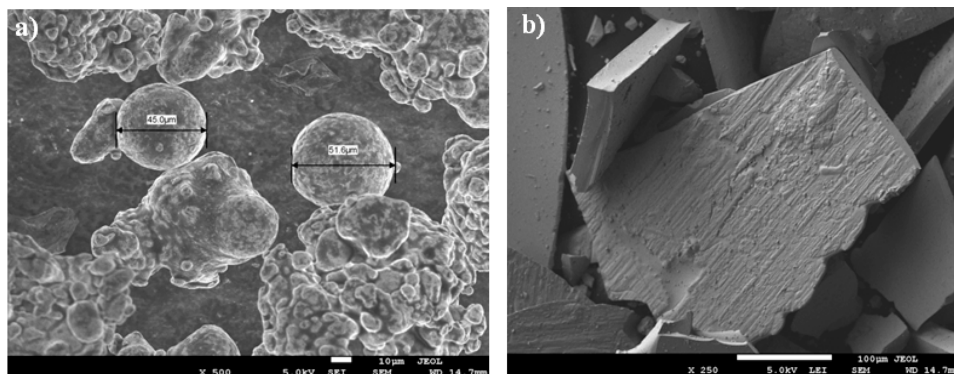
* Instytut Tele- i Radiotechniczny, 03-450 Warszawa, ul. Ratuszowa 11, e-mail: barbara.slusarek@itr.org.pl

składają się z obszarów o różnych właściwościach fizycznych, połączonych w jednym procesie technologicznym, bez dodatkowego klejenia, spawania lub lutowania. Możliwości jakie daje technologia hybrydowa są bardzo duże, przede wszystkim pozwalają na redukcję czasu i kosztów wytwarzania elementów silników elektrycznych. Dzięki czemu silniki elektryczne wytwarzane z proszkowych kompozytów staną się tańsze i bardziej energooszczędne. Taka technologia wymaga jednak zastosowania skomplikowanych matryc [1]. Bardzo popularną alternatywną metodą jest wykonywanie elementów obwodu magnetycznego z elementów kompozytowych poddanych klejeniu. Dotyczy to przede wszystkim materiałów o różnej temperaturze utwardzania. Ograniczeniem jest też wykonywanie obwodów magnetycznych o dużych wymiarach ze względu na konieczność stosowania dużych nacisków pras hydraulicznych, w takim przypadku konieczne jest wykonywanie obwodu z kilku elementów. Łączenie gotowych elementów odbywa się w odrębnym procesie z wykorzystaniem klejów epoksydowych lub cyjanoakrylanowych. Zaletą technologii klejenia materiałów jest możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanych kształtach i dużych wymiarach. Naklejanie magnesów trwałych na powierzchnie wirnika to popularne rozwiązanie stosowane w silnikach BLDC. Problemem przy wytwarzaniu obwodów magnetycznych metodą klejenia jest zapewnienie dużej wytrzymałości spoiny łączącej.

W ramach realizowanego projektu strukturalnego: *Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa* w kooperacji z Instytutem Chemii Przemysłowej prowadzone są badania nad doбором odpowiednich środków wiążących elementy kompozytowe. Klejenie elementów wykonanych w technologii proszkowej wymaga uwzględnienia wielu czynników. Struktura powierzchni poddawanej klejeniu, zależy od rodzaju stosowanego proszku magnetycznego, środka wiążącego i środka poślizgowego oraz parametrów procesów produkcyjnych.

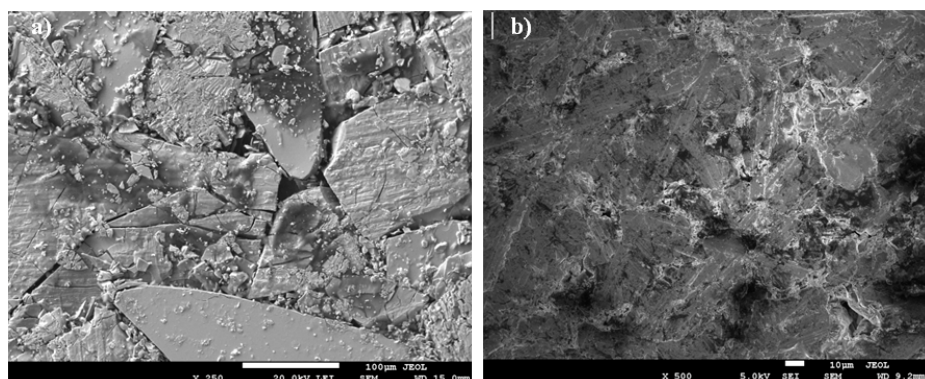
Kompozyty magnetycznie miękkie na bazie proszków żelaza mogą zawierać jeden z dwóch rodzajów substancji wiążących. Podobnie jak w przypadku magnesów trwałych stosuje się żywice epoksydowe, ale największą grupę stanowią spoiwa ceramiczne, którymi pokrywa się ziarna żelaza na etapie produkcji proszku. Ziarna żelaza pokryte substancjami ceramicznymi są odporne na utlenianie, a dzięki dielektrycznym właściwościom powłoki po utwardzeniu elementy obwodu magnetycznego mają małe straty wiropądowe. Utwardzanie dielektromagnetyków, może odbywać się w różnych temperaturach z zakresu 180 °C–600 °C, w zależności od stosowanego spoiwa.

Ziarna proszków żelaza o średnicy około 100 μm, natomiast materiały na bazie szybko chłodzonej taśmy Nd-Fe-B około 200 μm, co dobrze widać na rysunku 2. Dlatego wypraski wykonane z takich materiałów mogą mieć różne chropowatości. Inny jest również współczynnik rozszerzalności cieplnej takich materiałów.



Rys. 1. a) Ziarna proszku żelaza b) ziarna proszku stopu Nd-Fe-B
 Fig. 1. a) Iron powder grains b) grains of powder alloy Nd-Fe-B

Wypraski z materiału magnetycznie twardego na bazie proszków z szybko chłodzonej taśmy ze stopu Nd-Fe-B wiąże się żywicami epoksydowymi. Najczęściej stosuje się żywice jednoskładnikowe w postaci ciał stałych np. Epidian 100. Utwardzanie takich żywic odbywa się w piecach bez atmosfery ochronnej w temperaturze od 120 °C–200 °C. Powierzchnie dielektromagnesu wiązanej żywicą Epidian 100 oraz powierzchnia dielektromagnetyku pokazano na rysunku 1. Dielektromagnetyk wykonano z proszku Somaloy 500 spajanego tworzywem LB1. Skład żywicy LB1 jest tajemnicą firmy Höganäs.



Rys. 2. Zdjęcie SEM powierzchni; a) magnesu wiązanego b) dielektromagnetyka
 Fig. 2. SEM picture of the surface; a) bonded magnet b) SMC element

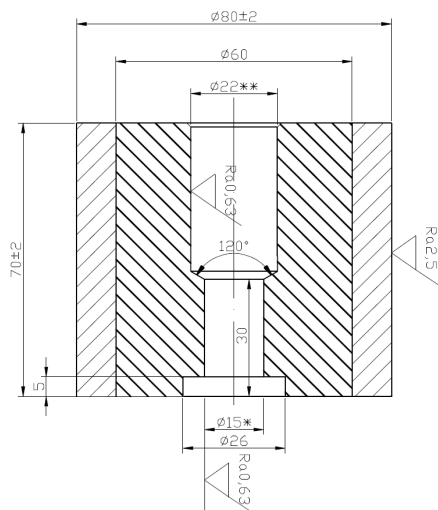
Powierzchnia magnesów wiązanych, czyli dielektromagnesów ma zróżnicowaną strukturę. Ziarna proszku Nd-Fe-B mają nieregularne kształty. Natomiast ziarna proszku żelaza mają kształt zbliżony do kulistego. Część ziaren ulega deformacji i kruszeniu podczas prasowania.

Ponadto parametry procesu technologicznego również mogą mieć wpływ na użytkiwane powierzchnie. Istnieje korelacja pomiędzy ilością i rodzajem stosowanego środka poślizgowego, a ilością defektów na powierzchni wypraski. Dzieje się tak na skutek redukcji środka poślizgowego podczas utwardzania. Temperatura zapłonu stearynianu cynku $C_{36}H_{70}O_4Zn$, wynosi $180\text{ }^{\circ}C$. W takiej temperaturze utwardzane są magnesy spajane stałymi żywicami epoksydowymi, takimi jak Epidian 100. Wypalanie się środka poślizgowego może powodować powstawanie uszkodzeń na powierzchniach magnesów.

Technologia proszkowa stwarza możliwość produkcji obwodów magnetycznych w jednym procesie technologicznym. Wymaga to zastosowania matrycy o kształcie i wymiarach stojana. Taka technologia znacznie redukuje koszty i czas produkcji gotowych stojanów, bez dodatkowej obróbki mechanicznej. Wymaga jednak zastosowania pras hydraulicznych o dużych naciskach oraz skomplikowanych matryc. W przypadku produkcji modelowej, możliwa i celowa ekonomicznie jest obróbka mechaniczna wykonanych dielekromagnetyków i dielektromagnesów. Podczas takiej produkcji nieuniknione jest stosowanie połączeń klejonych. Elementy prototypowych obwodów magnetycznych mogą być wykonywane metodą elektrodrażenia. Uzyskane w ten sposób elementy poddaje się klejeniu. Dobór odpowiednich klejów należy przeprowadzić z uwzględnieniem typów klejonych powierzchni, odpowiedniej wytrzymałości i sprężystości klejów oraz warunków w jakich klejone elementy będą pracować. Badania prowadzone w ramach projektu mają na celu porównanie wytrzymałości spoin wykonanych dostępnymi na rynku klejami.

2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Jednym z istotnych zadań realizowanych w ramach projektu jest opracowanie metod klejenia elementów kompozytowych. Przeprowadzone badania polegają na badaniu wytrzymałości spoin klejonych. W badaniach porównywano wytrzymałość połączeń między elementami wykonanymi z identycznych materiałów oraz spoiny łączące materiały o różnych właściwościach magnetycznych, czyli elementy hybrydowe. Badania prowadzono według specjalnie opracowanej metody bazującej na normie DIN 53288 [2]. Według tej normy wykonane walce po sklejeniu umieszcza się w uchwytach maszyn wytrzymałościowych [3]. Ze względu na mniejszą w stosunku do stali wytrzymałość na ściskanie materiałów kompozytowych, aby zapobiec uszkodzeniu próbek i zapewnić stabilny uchwyt próbki zaprojektowano specjalny kształt próbek. W ramach prac wykonano odpowiednie matryce oraz uchwyty montażowe. Na rysunku 3 pokazano wymiary matrycy do wykonywania próbek badawczych, a na rysunku 4 próbkę zainstalowaną w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 3. Matryca do produkcji próbek badawczych
Fig. 3. Die for test samples production



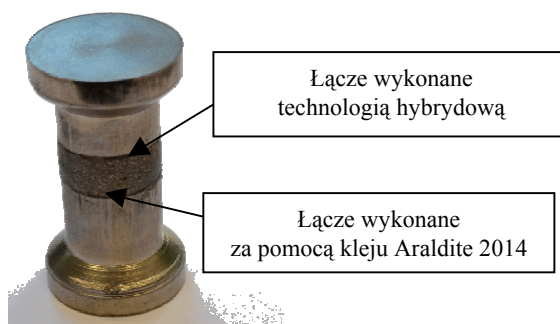
Rys. 4. Próbką umieszczona w uchwytach maszyny zrywającej
Fig. 4. The sample located in holders of breaking machine

W badaniach zastosowano dwa rodzaje kompozytowych elementów, magnetycznie miękkie wykonane z proszku Somaloy 500 + LB1 oraz magnetycznie twarde z proszku MQP-B. Wykonano też element hybrydowy składający się z takich proszków wykonany w jednym procesie technologicznym. Wszystkie elementy przeznaczone do klejenia wykonano w tej samej matrycy i utwardzono w temperaturze 180 °C przez 2 godziny. Wszystkie klejone powierzchnie przed klejeniem poddano czyszczeniu i odtuszczeniu za pomocą acetonu. Klejone elementy umieszczano w specjalnie wykonanym uchwycie

pozwalającym na utrzymanie stałej siły dociskającej klejone powierzchnie. Wykonano dwa rodzaje próbek, zawierające dwa elementy z materiału magnetycznie miękkiego oraz próbki składające się z materiału magnetycznie miękkiego i magnetycznie twardego.

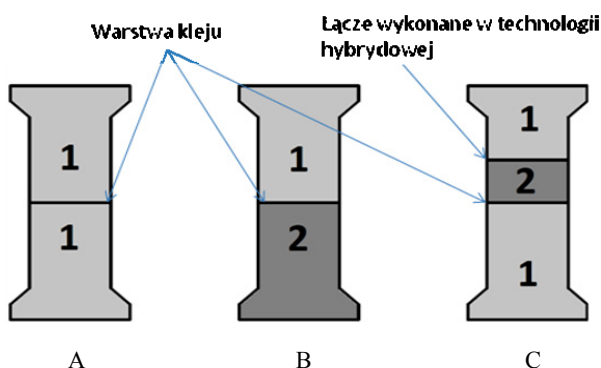
Do wykonania spoin wykorzystano pięć komercyjnych klei przeznaczonych do łączenia metali:

- Pokxipol – epoksydowy dwuskładnikowy,
- Araldite 2014 – epoksydowy dwuskładnikowy (2:1),
- CX-80 – epoksydowy dwuskładnikowy,
- Araldite 2021 – metakrylowy dwuskładnikowy,
- Bison EPOXY METAL – epoksydowy dwuskładnikowy.



Rys. 5. Gotowa do testów próbka złożona z elementu hybrydowego oraz łącza klejonego
Fig. 5. Ready to break sample composed of hybrid element and adhesive layer

Na rysunku 6 pokazano wszystkie typy próbek przeznaczone na badania wytrzymałości na zrywanie.



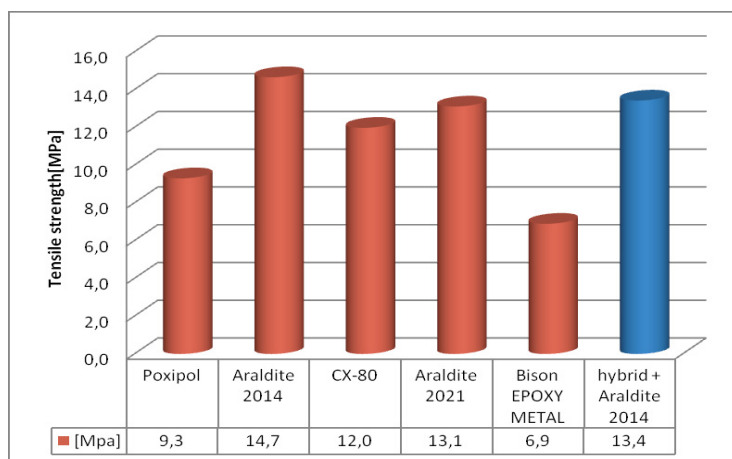
Rys. 6. Typy stosowanych próbek: A – elementy magnetycznie miękkie,
B elementy magnetycznie miękkie i twarde, C – element hybrydowy i element magnetycznie miękkie
Fig. 6. Kinds of samples used in research: A – Soft magnetic components,
B – elements of the magnetically soft and hard, C – hybrid element and an element of magnetically soft

Wykonano również dodatkową serię próbek zawierających trzy warstwy magnetyczne. Dwie warstwy wykonano w jednym procesie technologicznym a trzecią dołączono za pomocą kleju. Zastosowanie tego rodzaju próbek ma posłużyć do bezpośredniego porównania wytrzymałości złącz klejonego i łącza hybrydowego. W przypadku tej serii pomiarów wykorzystano tylko jeden rodzaj kleju – Araldite 2014. Wykonaną w ten sposób próbkę pokazano na rysunku 5.

3. WYNIKI

Pomiary wytrzymałości na zrywanie elementów klejonych wykonywano w temperaturze pokojowej, 24 h po wykonaniu spoin. Badania wytrzymałościowe prowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej typu INSTRON. Przeprowadzono badania wytrzymałości spoin próbek typu B, czyli pomiędzy materiałami magnetycznie twardymi i magnetycznie miękkimi. Wykonano też pomiary wytrzymałości na zrywanie próbki hybrydowej typu C. Wyniki przedstawiono na rysunku 7.

Wyniki badań przedstawione na rysunku pokazują że najlepszą wytrzymałość mają próbki klejone klejami typu Araldite. Podobną wytrzymałość ma próbka hybrydowa typu C.



Rys. 7. Wytrzymałości na zrywanie spoin pomiędzy kompozytami magnetycznie miękkimi a magnetycznie twardymi (typ B) oraz wytrzymałość złącza hybrydowego (typ C)

Fig. 7. Tensile strength of welds between composites of magnetically soft and magnetically hard (type B) and the strength of a hybrid connections (Type C)

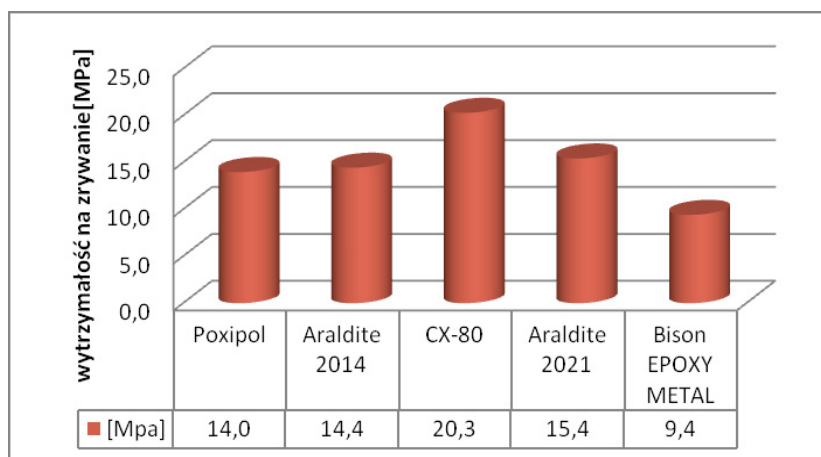
W przypadku spoiny typu B (rys. 8B) rozerwanie próbki następowało w miejscu spoiny, natomiast na powierzchniach po zrywaniu widoczne są wyrwane fragmenty

dielektromagnesu. Elementy wykonane w technologii hybrydowej ulegały zerwaniu w części magnetycznie twardej. Dla wszystkich próbek pęknięcie zlokalizowane było w pobliżu granicy materiału magnetycznie twardego i magnetycznie miękkiego. Próbkę poddane próbom wytrzymałościowym pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Próbkę po testach wytrzymałościowych
Fig. 8. Samples after strength tests

Przeprowadzono również badania wytrzymałości na zrywanie próbek klejonych wykonanych z proszku magnetycznie miękkiego – typ A. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki pomiaru wytrzymałości na zrywanie tego typu próbek.

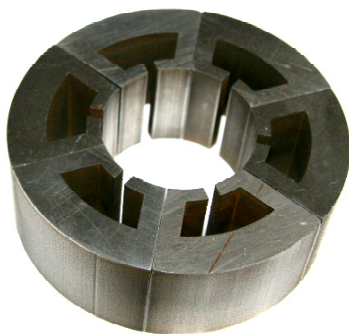


Rys. 9. Wytrzymałości na zrywanie spoin pomiędzy kompozytami magnetycznie miękkimi (typ A)
Fig. 9. Tensile strength of welds between soft magnetic composites (type A)

W przypadku klejenia materiałów magnetycznych na bazie żelaza najlepszy okazał się klej epoksydowy CX-80.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazują, że rodzaj zastosowanego kleju wpływa na wytrzymałość na rozciąganie spoin klejonych. Jednocześnie wyniki badań wskazują, że wytrzymałość na rozciąganie zależy też od rodzaju materiałów magnetycznych, które poddawane są procesowi klejenia. Inna jest wytrzymałość na rozciąganie spoiny łączącej dwa elementy wykonane z tego samego materiału, niż wytrzymałość na rozciąganie spoiny łączącej próbkę wykonaną z materiału magnetycznie twardego i miękkiego. Wytrzymałość na rozciąganie elementu hybrydowego jest zbliżona do wytrzymałości na rozciąganie elementów wykonanych metodą klejenia. Wyniki pomiarów pokazują, że możliwe jest wytwarzanie obwodów magnetycznych metodą klejenia. W przypadku wytwarzania obwodu magnetycznego należy uwzględnić rodzaje materiałów, które mają zostać poddane procesowi klejenia oraz przeprowadzić dobór odpowiedniego kleju. Na rysunku 10 przedstawiono przykład obwodu magnetycznego stojana silnika BLDC wykonanego metodą klejenia elementów.



Rys. 10. Obwód magnetyczny wykonane technologią klejenia
Fig. 10. Magnetic circuit made of adhesive technology

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy POIG.01.01.02-00-113/09.

BIBLIOGRAFIA

- [1] KAPELSKI D., ŚLUSAREK B., JANKOWSKI B., KARBOWIAK M., PRZYBYLSKI M., *Powder magnetic circuits in electric machines*, 14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, Istanbul, Turkey, 13–16 July 2011.

- [2] DIN 53288 – *Testing of adhesives for metals and adhesively bonded metal joints; tensile test*, Niemcy, 1979.
- [3] LOCTITE Worldwide Design Handbook – 12.3 *Ustalanie wartości wytrzymałościowych*, <http://www.kleje-loctite.pl/book/i218ch12.htm>, 20.07.2011.
- [4] ŚLUSAREK B., PRZYBYLSKI M., *The influence of the kind of powder on physical properties of soft magnetic composites*, International EURO PM2009 Congress and Exhibition, 12–14 October, Copenhagen, Denmark.
- [5] ŚLUSAREK B., JANKOWSKI B., KAPELSKI D., KARBOWIAK M., PRZYBYLSKI M., *The influence of Connecting Method of Hybrid Magnetic Elements for Their Properties*, PowderMet, 18–21 May 2011, The International Conference on Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, San Francisco, USA, May 18–21, 2011.

HYBRID MAGNETIC CIRCUIT ELEMENTS PRODUCED BY BONDING

The development of new technologies and materials, gives designers of electric motors more new options. Application of soft magnetic composite powder and permanent bonded magnets allows to construct motor impossible to made of electrical sheet. Powder metallurgy enables the production of components with a layer structure-called a hybrid. Such elements are composed of layers with different physical properties. Restriction hybrid technology is the shape of the elements and the curing temperature of the materials used. Therefore, in some applications, it is inevitable the use of bonding. The main objective of the study is to compare the mechanical properties of double layer elements, different types of adhesives bonded and components made in one pressing process.