



Tomasz Durejko*, Zbigniew Zarański, Stanisław Sulej

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Katedra Zaawansowanych Materiałów i Technologii
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland

* Corresponding author. E-mail: tdurejko@wat.edu.pl

Otrzymano (Received) 18.02.2008

KONSTYTUOWANIE WARSTWY WIERZCHNIEJ SPIEKÓW $\text{FeAl}+\text{Al}_2\text{O}_3$ MIKROOBRÓBKĄ ELEKTROEROZYJNĄ

Kompozyty na osnowie fazy międzymetalicznej FeAl umacniane cząstkami Al_2O_3 są postrzegane jako zamienniki dla obecnie stosowanych stopów żaroodpornych i żarowytrzymałych. Wytwarzanie tego typu materiałów tradycyjnymi metodami topienia i odlewania wiąże się ze stosowaniem dodatkowej, skomplikowanej obróbki cieplno-plastycznej, co znacznie wydłuża i podraża proces technologiczny. Prowadzone badania technologiczne kompozytów $\text{FeAl}+\text{Al}_2\text{O}_3$ wskazują na przydatność podczas ich wytwarzania technik z obszaru metalurgii proszków. Powoduje to jednak znaczne ograniczenia, jeśli chodzi o obróbkę końcową spieku. W tym przypadku jedną z metod kształtowania struktury warstwy wierzchniej może być obróbka elektroerozyjna. W badaniach prezentowanych w niniejszej pracy jako materiał badawczy wykorzystano kompozyty $\text{FeAl}+\text{Al}_2\text{O}_3$ otrzymane metodą dwuetapowego spiekania mieszaniny czystych technicznie proszków żelaza i aluminium. Właściwości warstwy wierzchniej kształtowano za pomocą zgrubnej i wykańczającej obróbki elektroerozyjnej drutem o średnicy 0,1 i 0,25 mm (WEDM). Przeanalizowano wpływ wariantów obróbki elektroerozyjnej na strukturę geometryczną warstwy wierzchniej. Na podstawie krzywej nośności wyznaczono parametry charakteryzujące badane spieki pod względem odporności na zużycie ściernie. Dodatkowo określono zmiany mikrostruktury w warstwie wierzchniej spieków.

Słowa kluczowe: kompozyty $\text{FeAl}+\text{Al}_2\text{O}_3$, struktura geometryczna powierzchni (SGP), obróbka elektroerozyjna, krzywa nośności

SURFACE LAYER OF $\text{FeAl}+\text{Al}_2\text{O}_3$ COMPOSITES CONSTITUED BY ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

The iron aluminides FeAl have been among the most widely investigated intermetallics. For example, they have relatively low density, high stiffness, and excellent resistance to oxidation and corrosion at elevated temperature. Their major disadvantages is the susceptibility to environmental embrittlement at room temperature, very poor strength and creep resistance above 600°C. This problem can be partially solved by microalloying and oxide dispersion strengthening (ODS). The cost of manufacturing process is essential part of all costs, especially for new materials, so there are many trials to introduce unconventional solutions of processing or to modify well known technologies, such powder metallurgy (PM). We proposed a PM process termed sintering at cyclic loading, as an alternative fabrication method, by which dense FeAl intermetallics were produced successfully from elemental powder mixtures with addition nanosize Al_2O_3 . The $\text{FeAl}+\text{Al}_2\text{O}_3$ composite was obtained by two-stage sintering of elemental iron and aluminium powders with a 1% volumetric addition of nano- Al_2O_3 . In the first stage of a processing, a powder charge was compacted/sintered under cyclically pressure. Structurally inhomogeneous powder compacts were then loosely sintered in argon atmosphere. The obtained sinters with composite structures were treated via two-variant (different wire diameter - 0.1 and 0.25 mm) roughing and finishing wire electrical discharge machining (WEDM). Sinters microstructure and surface texture (ST) after WEDM process were analyzed. On the base of measured roughness profiles a load capacity curve and quantitative parameters determining abrasive wear resistance of investigated sinters were found. Additionally, a 3D spatial roughness profile was registered for each sample. It was found that height of roughness after 0.25 mm wire finishing EDM is about one and a half time and three times lower than sinter roughness after 0.1 mm wire roughing and 0.1 mm wire finishing EDM, respectively.

Keywords: $\text{FeAl}+\text{Al}_2\text{O}_3$ composite, surface texture (ST), electrical discharge machining (EDM), load capacity curve

WSTĘP

Rosnące zapotrzebowanie na materiały nowej generacji (konstrukcyjne i funkcjonalne) do pracy w podwyższonej temperaturze wymusza stosowanie nie tylko nowych kombinacji ich struktury, ale również nowych

technologii wytwarzania. Do tej grupy należy zaliczyć między innymi materiały na osnowie fazy międzymetalicznej FeAl, otrzymywane drogą metalurgii czystych technicznie proszków żelaza i aluminium. Badania pro-

wadzone od kilku lat przez zespół Katedry Zaawansowanych Materiałów i Technologii WAT dowodzą, że odpowiednia modyfikacja procesu wytwarzania stopów na osnowie fazy FeAl oraz dodatek nanoceramiki tlenkowej Al₂O₃ (zgodnie z koncepcją stopów ODS [1, 2]) umożliwia otrzymanie materiałów o właściwościach predestynujących je do zastosowań wysokotemperaturowych (dobra plastyczność, wysoka odporność na pełzanie itp.) [3]. Mikrostruktura uzyskanych spieków składa się z mikrometrycznych tlenków Al₂O₃ rozmieszczonych na granicach ziaren intermetalicznej osnowy FeAl oraz nanometrycznych cząstek ceramiki Al₂O₃, umiejscowionych w objętości ziaren. Materiały te należą do grupy tworzyw trudno obrabialnych: po pierwsze z powodu występującej w ich objętości ceramiki tlenkowej (wysoka odporność na zużycie ściernie), a po drugie ze względu na niższą niż w materiałach odlewanych kohezję na granicach ziaren.

Kształtowanie postaci geometrycznej spieków FeAl najczęściej nie jest możliwe na drodze klasycznej obróbki ubytkowej (np. toczenia, frezowania itp.). Jednym z korzystnych rozwiązań wydaje się być zastosowanie obróbki elektroerozyjnej z użyciem przecinarki drutowej sterowanej numerycznie (WEDM). Technologia ta pozwala zarówno uzyskiwać złożone geometrycznie kształty (2^{1/2}D), jak również precyzyjnie (poprzez odpowiedni dobór parametrów prądowych obróbki) sterować strukturą geometryczną powierzchni (SGP) wytwarzanego elementu. Jest to szczególnie istotne ze względu na dynamicznie następujący wzrost zastosowań mikrosystemów w budowie i eksploatacji maszyn oraz rozwój mikrotechnologii i zwiększenie ich udziału w procesach wytwarzania zminiaturyzowanych części i konstrukcji.

W niniejszej pracy przedstawiono porównanie wyników analizy SGP spieków po zgrubnej i dokładnej mikroobróbce elektroerozyjnej. Utylitarnym efektem prowadzonych prac jest wstępna optymalizacja obróbki końcowej spieków na osnowie fazy FeAl+nanoAl₂O₃ i określenie odporności na zużycie ściernie, zdolności do przetrzymywania środka smarnego w warstwie powierzchniowej materiału oraz chropowatości rdzenia na podstawie analizy krzywej nośności wytypowanej SGP [4-6].

MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Materiał do badań uzyskano, stosując dwuetapowy proces spiekania, wstępnie ujednorodnionej w młynie kulowym Uni Ball 5, mieszaniny proszkowej technicznie czystych proszków żelaza (99,7%) i aluminium (99,5%), w proporcji 60 do 40 procent atomowych, z dodatkiem 1% objętościowo nanometrycznego Al₂O₃ (80 nm). Spiekanie wstępne zrealizowano w atmosferze powietrza na pulsatorze hydraulicznym INSTRON 8802 pod ciśnieniem cyklicznie zmiennym. Średnie ciś-

nienie prasowania przyjęto na poziomie 300 MPa (wyznaczonym na podstawie charakterystyki zagęszczalności użytej mieszaniny proszkowej). Uzyskane wypraski w postaci walca o średnicy 12 mm i wysokości 6 mm spiekano swobodnie w atmosferze argonu w czasie jednej godziny.

Spieki po pełnym cyklu obróbki cieplnej poddano obróbce elektroerozyjnej na sterowanej numerycznie przecinarkie drutowej BP-97d. Podczas cięcia (prostopadle do kierunku prasowania) stosowano dwa rodzaje drutu, mosiężny o średnicy 0,25 mm i wytrzymałości 500 MPa oraz wolframowy o średnicy 0,1 mm i wytrzymałości 900 MPa. Dla przyjętej średnicy drutu zaproponowano dwa rodzaje obróbki: zgrubną, polegającą na przecięciu spieku FeAl, i dokładną - składającą się z cięcia i dwukrotnego przejścia wyiskrzającego (bez zagłębiania się drutu w powierzchnię obrabianą).

Badania metalograficzne, w ujęciu ilościowym, przeprowadzono, wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy Philips XL30/LaB₆. Powierzchnię spieków bezpośrednio po cięciu elektroerozyjnym obserwowano, używając detektora BSE. Następnie przygotowane próbki inkludowano w termoutwardzalnej żywicy przewodzącej, szlifowano mechanicznie na szlifierko-polerce STRUERS PLANOPOL 3 i polerowano na dyskach polerskich z użyciem zawiesiny diamentowej.

Stan SGP otrzymanych spieków w ujęciu makroskopowym analizowano na podstawie badań stykowych, wykonanych za pomocą profilografometru PGM-1C. Powierzchnię wyprasek po obróbce elektroerozyjnej analizowano na podstawie profilu chropowatości, wyznaczając podstawowe parametry amplitudowe. Dla każdej z próbek zarejestrowano przestrzenny profil chropowatości 3D. W celu wyznaczenia w sposób ilościowy parametrów SGP, mających wpływ na odporność na zużycie ściernie, dla wytypowanych wariantów obróbki wykreślono krzywe nośności, wykorzystując profil badanej powierzchni.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

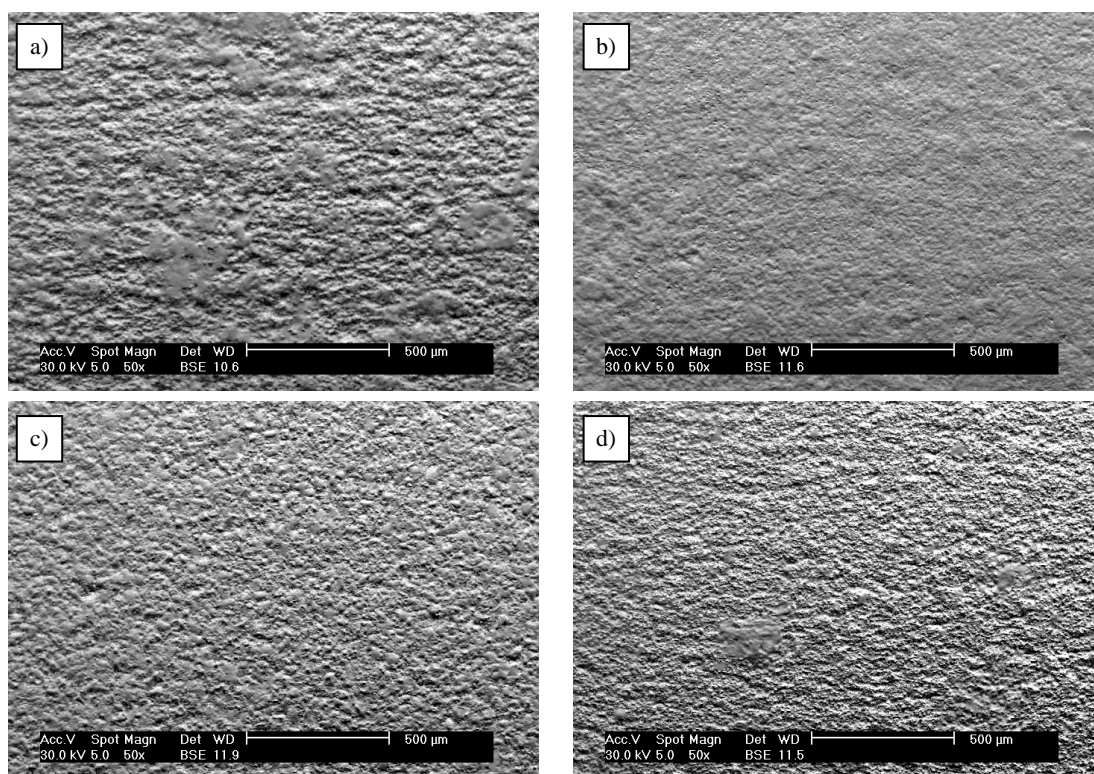
Przeprowadzone wcześniej badania strukturalne spieków wykazały, że charakteryzują się one jednorodną chemicznie osnową w postaci fazy FeAl oraz mikrometrycznymi i nanometrycznymi tlenkami Al₂O₃, równomiernie rozmieszczonymi odpowiednio na granicach i w objętości ziaren osnowy [7]. Gęstość otrzymanych materiałów kształtowała się na poziomie 94% gęstości teoretycznej.

Analiza powierzchni spieków po obróbce elektroerozyjnej w ujęciu mikro wykazała, że niezależnie od średnicy drutu i rodzaju obróbki (zgrubna, wykańczająca) ma ona charakter izotropowy (rys. 1). Rozmiar „kraterów” na badanych powierzchniach po obróbce zgrubnej zależy przede wszystkim od średnicy drutu (rys. 1a, c). Należy zauważyć jednak, że w przypadku cięcia

drutem o średnicy 0,25 mm obróbka wykańczająca powoduje wyraźne wygładzenie powierzchni spieku, natomiast w przypadku drutu ϕ 0,1 mm stan powierzchni po przejściach wyiskrzających nie zmienia się (rys. 1b, d).

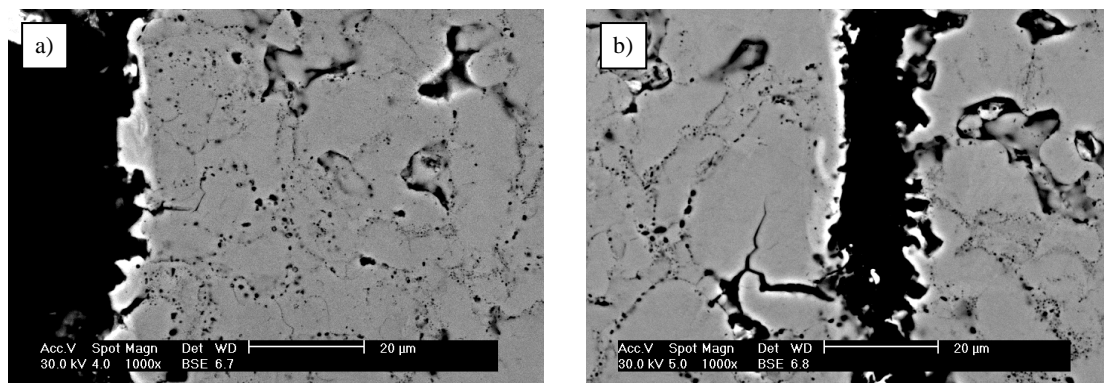
Na trawionych zglądach wzdłużnych zaobserwowano występowanie strefy o kolorze zbliżonym do białego. Jej szerokość wynosi kilka mikrometrów i jest porównywalna dla obu wariantów cięcia (drutu o średnicy 0,25 i 0,1 mm) (rys. 2). Punktowa analiza chemiczna wykazała, że skład tej strefy jest zmieniony w stosunku do składu chemicznego intermetalicznej osnowy FeAl. Podczas wysokoenergetycznych wyładowań elektrycznych następuje miejscowe nadtapianie obrabianego ma-

teriału, co wraz z występowaniem zwarć skutkuje dyfuzją składników drutu w warstwę wierzchnią spieku. Intensywne chłodzenie obrabianej powierzchni (cięcie odbywa się w strumieniu wody destylowanej) oraz punktowy charakter wyładowań ogranicza skutecznie zasięg dyfuzji. Zmiana odcienia szarości obserwowana w detektorze BSE jest więc prawdopodobnie tylko efektem zmiany składu chemicznego warstwy wierzchniej, a nie powstania amorficznej, twardej warstwy „białej”. Podczas przepływu prądu elektrycznego tlenki występujące na granicach ziaren FeAl stanowią dielektryk, który, prawdopodobnie pękając, prowadzi do utraty wiązkości pomiędzy ziarnami w strefie przypowierzchniowej spieków (rys. 2b).



Rys. 1. Morfologia powierzchni spieków po obróbce elektroerozyjnej: a) obróbka zgrubna, drut 0,25 mm; b) obróbka wykańczająca, drut 0,25 mm; c) obróbka zgrubna, drut 0,1 mm; d) obróbka wykańczająca, drut 0,1 mm

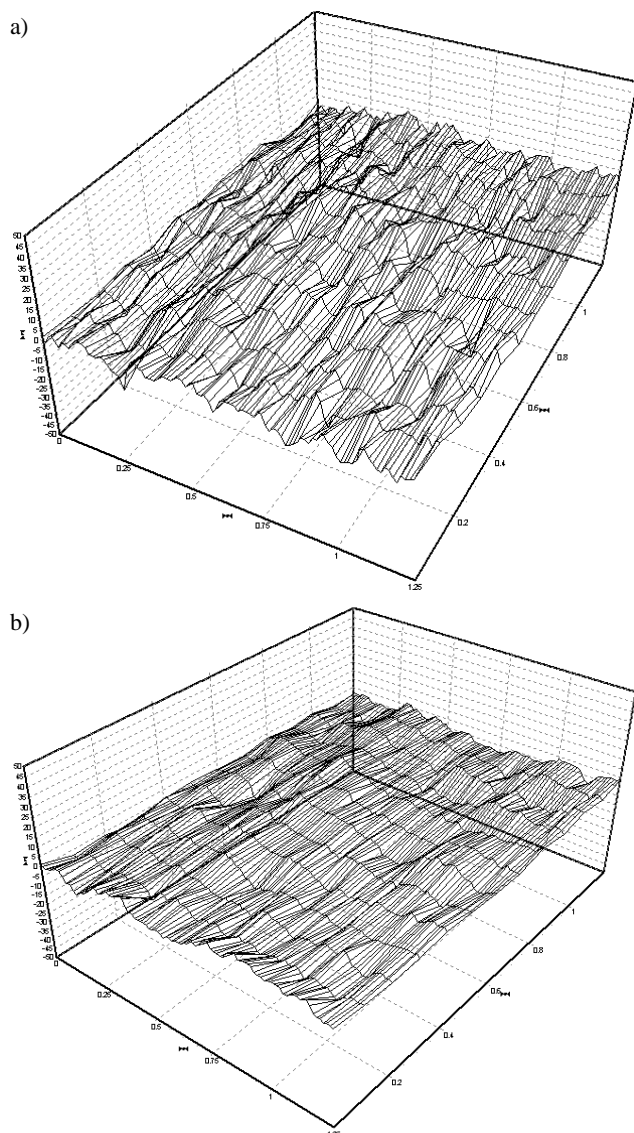
Fig. 1. Morphology of sinters surface after EDM: a) roughing, 0.25 mm wire; b) finishing, 0.25 mm wire; c) roughing, 0.1 mm wire; d) finishing, 0.1mm wire



Rys. 2. Przekrój wzdłużny spieków po cięciu elektroerozyjnym (po obróbce zgrubnej): a) drut 0,25 mm; b) drut 0,1 mm

Fig. 2. Longitudinal intersection of sinters after roughing EDM: a) 0.25 mm wire; b) 0.1 mm wire

Badania makroskopowe warstwy wierzchniej spieków ODS potwierdziły izotropowy charakter powierzchni po obróbce elektroerozyjnej. Uzyskane profile 3D dla poszczególnych wariantów obróbki (rys. 3) korelują z obrazami powierzchni spieków w ujęciu mikro (rys. 1a, b). W przypadku obróbki drutem ϕ 0,25 mm nierówności powierzchni (profil niefiltrowany) bezpośrednio po cięciu mają średnią wysokość rzędu 2,75 μm (rys. 3a), a dla cięcia drutem ϕ 0,1 mm - rzędu 3,86 μm . Przejścia wyiskrzające prowadzą w przypadku drutu o mniejszej średnicy do zwiększenia średniej nierówności powierzchni do poziomu 6,23 μm , natomiast obróbka wykańczająca drutem 0,25 mm przyniosła pożądany efekt, zaobserwowano wygładzenie powierzchni spieku do poziomu 2,22 μm (rys. 3b). Normatywne parametry chropowatości dla wszystkich wariantów obróbki przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Profil chropowatości 3D powierzchni spieku ODS po obróbce elektroerozyjnej drutem o średnicy 0,25 mm: a) obróbka zgrubna; b) obróbka wykańczająca

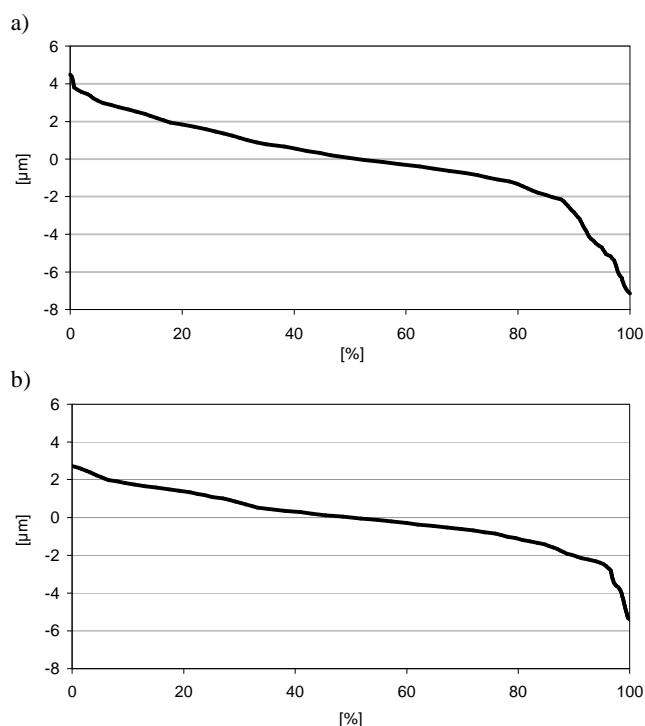
Fig. 3. Roughness 3D profile of sinter surface after 0.25 mm wire EDM: a) roughing; b) finishing

TABELA 1. Podstawowe parametry wysokościowe chropowatości powierzchni spieków po obróbce elektroerozyjnej

TABLE 1. Main height roughness parameters of investigated surface of sinters after electric discharge machining (EDM)

Rodzaj obróbki, średnica drutu	Parametr chropowatości, μm					
	R_p	R_v	R_z	R_a	R_q	R_z10p
zgrubna, 0,25 mm	4,24	4,65	8,89	1,91	2,28	10,05
wykańczająca, 0,25 mm	1,83	2,01	3,83	0,75	0,91	4,02
zgrubna, 0,1 mm	6,42	7,44	13,86	2,83	3,40	15,11
wykańczająca, 0,1 mm	5,46	6,06	11,53	2,40	3,02	11,84

Pod względem nośności przeanalizowano tylko powierzchnie spieków po obróbce zgrubnej i wykańczającej z użyciem drutu ϕ 0,25 mm. Na rysunku 4 zamieszczono krzywe Abbotta-Firestone'a uzyskane dla wybranych warstwic z profili 3D (rys. 3). Na ich podstawie obliczono zredukowaną wysokość wzniesień Rpk i wgłębień Rvk , wysokość chropowatości rdzenia Rk oraz udziały nośne wierzchołków $Mr1$ i wgłębień $Mr2$. Wartości parametrów krzywych nośności analizowanych spieków przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 4. Krzywe nośności spieków po obróbce elektroerozyjnej drutem o średnicy 0,25 mm zgrubnej (a) i wykańczającej (b)

Fig. 4. Load capacity curve of sinters after 0.25 mm wire EDM: a) roughing; b) finishing

Krzywe nośności dla badanych spieków mają kształt litery S (rys. 4), typowy dla powierzchni o losowo rozmieszczonych nierównościach. Można wyróżnić na nich trzy charakterystyczne odcinki: pierwszy, w któ-

rym krzywa gwałtownie opada, drugi - o łagodnym spadku liniowym i trzeci o przebiegu podobnym do pierwszego.

Zredukowana wysokość wzniesień Rpk charakteryzuje część powierzchni, która zostanie usunięta w czasie „docierania”, czyli w początkowym okresie współpracy powierzchni. Można więc traktować ten parametr jako miarę odporności na zużycie ściernie. Zdecydowanie mniejsza (około dwukrotnie) wartość parametru Rpk dla powierzchni spieku po obróbce wykańczającej wskazuje na jego większą odporność na zużycie ściernie w porównaniu z powierzchnią uzyskaną w wyniku obróbki zgrubnej.

Wysokość chropowatości rdzenia profilu Rk informuje o wysokości nierówności powierzchni po okresie „docierania”. Jej wartość jest niezależna od wysokości wzniesień i głębokości wgłębień profilu. Analizując uzyskane wartości Rk dla badanych stanów powierzchni, wynika, że nośność powierzchni po obróbce wykańczającej, po okresie „docierania”, będzie większa. O wysokiej nośności powierzchni spieków po okresie docierania świadczą duże różnice pomiędzy udziałami nośnymi wierzchołków $Mr1$ i wgłębień $Mr2$ (porównywalne dla obu wariantów obróbki).

Zredukowana głębokość wgłębień Rvk jest miarą zdolności powierzchni do utrzymywania w ukształtowanych wgłębieniach czynnika smarnego. W tym przypadku przewagę (wyższą zdolność) wykazuje spiek po obróbce zgrubnej.

TABELA 2. Parametry krzywej nośności dla powierzchni spieków po obróbce zgrubnej i wykańczającej drutem 0,25 mm

TABLE 2. Parameters of load capacity curve for sinters surface after 0.25 mm wire roughing and finishing machining

Rodzaj obróbki	Parametr nośności				
	Rpk μm	Rvk μm	Rk μm	$Mr1$ %	$Mr2$ %
zgrubna	1,17	4,47	5,81	3,85	90,66
wykańczająca	0,64	2,88	4,08	6,59	94,51

PODSUMOWANIE

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że istnieje możliwość kształtowania SGP materiałów spiekanych FeAl poprzez obróbkę elektroerozyjną. W zależności od

średnicy użytego drutu i rodzaju obróbki (zgrubna, wykańczająca) można z pewnością w istotny sposób wpływać np. na odporność na zużycie ściernie. Zaskakujący jest fakt, że obróbka zgrubna drutem ϕ 0,1 mm wpływa niekorzystnie na powierzchnię spieku (wzrost nierówności w stosunku do obróbki drutem ϕ 0,25 mm), a wykańczająca dodatkowo ten stan pogarsza. Lepszym rozwiązaniem podczas obróbki elektroerozyjnej materiałów spiekanych jest więc stosowanie drutu o większej średnicy. Uzyskane w tym przypadku nierówności powierzchni kształtują się na poziomie około 2 μm, przy czym obróbka wykańczająca (dwa przejścia wykańczające) powoduje dodatkowe wygładzenie powierzchni. Struktura geometryczna powierzchni uzyskana w wyniku cięcia elektroerozyjnego charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie ściernie. Świadczy o tym mała wartość parametru Rpk , która jest około dwukrotnie mniejsza od wartości dla powierzchni bezpośrednio po spiekaniu [7] (powierzchnia tego typu może być również traktowana jako eksploatacyjna). Po dwóch przejściach wykrzających analizowany parametr zmniejsza swoją wartość do poziomu 0,64 μm.

Dalsze prace badawcze będą dotyczyły doskonalenia technologii związanej z kształtowaniem geometrii warstwy wierzchniej (eksploatacyjnej) metodą obróbki elektroerozyjnej z użyciem drutu o średnicy 0,1 mm.

LITERATURA

- [1] Moris D.G., Possibilities for high-temperature strengthening in iron aluminides, *Intermetallics* 1998, 6, 753-758.
- [2] Arzt E. et al., Dispersion strengthening of intermetallics, *Materials Science & Engineering* 1997, A234-236, 22-29.
- [3] Durejko T., Józwick P., Karczewski K., Spieki na osnowie fazy międzymetalicznej FeAl - wytwarzanie i właściwości, XXXI Szkoła Inżynierii Materiałowej, 2003, 335-341.
- [4] Tomasiak J., Biało D., Zastosowanie parametrów krzywej udziału nośnego do opisu mikrogeometrii powierzchni porowatych, *Mechanik* 2003, 1, 26-28.
- [5] Oczko K.E., Liubimov V., Struktura geometryczna powierzchni, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [6] Durejko T., Zarański Z., Sulej S., Analiza struktury geometrycznej powierzchni spieków ODS FeAl+Al₂O₃, *Kompozyty (Composites)* 2007, 7, 1, 41-45.
- [7] Durejko T., Sulej S., Zarański Z., Struktura spieków o osnowie Fe40Al zbrojonych nanocząstkami Al₂O₃, *Inżynieria Materiałowa* 2006, 3, 588-590.