






Metalurgia proszków w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Obróbki Plastycznej

Powder metallurgy in Łukasiewicz Research Network – Metal Forming Institute

(1) Dariusz Garbiec*  (2) Volf Leshchynsky  (3) Tomasz Wiśniewski  (4) Rafał Rubach 
(5) Maria Wiśniewska 

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 10.06.2019

Recenzja: 24.06.2019

Akceptacja: 30.08.2019

Wkład autorów

- (1) Założenia, metodyka spiekania iskrowo-plazmowego (SPS)
- (2) Koncepcja, metodyka prasowania na zimno i spiekania swobodnego
- (3) Prasowanie na zimno i spiekanie swobodne
- (4) Badania materiałowe
- (5) Spiekanie iskrowo-plazmowe (SPS)

ORCID iD

- (1) <https://orcid.org/0000-0003-1114-6323>
- (2) <https://orcid.org/0000-0003-3807-0701>
- (3) <https://orcid.org/0000-0002-8112-8967>
- (4) <https://orcid.org/0000-0002-8620-2855>
- (5) <https://orcid.org/0000-0002-5292-2926>

Article info

Received: 10.06.2019

Reviewed: 24.06.2019

Accepted: 30.08.2019

Authors' contribution

- (1) Assumptions, methodology of SPS
- (2) Concept, methodology of cold pressing and free sintering

Streszczenie

W artykule przedstawiono metody metalurgii proszków wykorzystywane do wykonywania wyrobów z proszków metalicznych i ceramicznych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Obróbki Plastycznej. Do wytwarzania zaawansowanych materiałów metalicznych, ceramicznych oraz kompozytowych zastosowano nowoczesną metodę spiekania iskrowo-plazmowego z wykorzystaniem urządzenia SPS HP D 25-3. Urządzenie to pozwala na realizację procesów spiekania w temperaturze do 2200°C z jednoczesnym prasowaniem z siłą do 250 kN w próżni, atmosferze azotu, argonu lub wodoru. Z kolei do wykonywania wyrobów z proszków na bazie żelaza stosowana jest konwencjonalna metoda prasowania jednoosiowego na zimno i następującego po nim spiekania swobodnego w atmosferze azotowo-wodorowej zdysocjowanego amoniaku z wykorzystaniem gniazda badawczo-doświadczalnego GSMP-75 wyposażonego w piec wgłębny retortowy PSF-12/75. Maksymalna temperatura spiekania wynosi 1200°C. Ponadto omówiono przykładowe prace naukowo-badawcze zrealizowane w ramach zarówno projektów międzynarodowych finansowanych z 7 PR UE oraz Horyzontu 2020, jak i projektów krajowych realizowanych we współpracy z przemysłem. Zaprezentowano wybrane wyniki badań dotyczące kompozytowych sektorów tnących stosowanych w piłach do cięcia kamieni, kompozytowych elektrod nasadkowych stosowanych w zrobotyzowanych stanowiskach zgrzewania punktowego oraz płytek skrawających wykonanych z węglików spiekanych stosowanych w obróbce mechanicznej metali. Poza tym wskazano gałęzie przemysłu, na potrzeby których ŁUKASIEWICZ – INOP wykonuje prace naukowo-badawcze oraz realizuje wdrożenia. Zaprezentowano także ofertę współpracy dla przemysłu.

Słowa kluczowe: metalurgia proszków, prasowanie, spiekanie, spiekanie iskrowo-plazmowe

Abstract

The article presents the powder metallurgy methods used to make products from metallic and ceramic powders in the Łukasiewicz Research Network – Metal Forming Institute. To produce advanced metallic, ceramic and composite materials, the method of spark plasma sintering employing an SPS HP D 25-3 was used. This device allows sintering processes to be performed at temperatures up to 2200°C with simultaneous compaction with a force of up to 250 kN in vacuum, and in a nitrogen, argon or hydrogen atmosphere. On the other hand, to make products from iron-based powders, the conventional method of cold uniaxial pressing and subsequent free sintering in a nitrogen-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; e-mail: dariusz.garbiec@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; e-mail: dariusz.garbiec@inop.poznan.pl

- (3) *Cold pressing, free sintering*
- (4) *Material testing*
- (5) *SPS testing*

ORCID iDs

- (1) <https://orcid.org/0000-0003-1114-6323>
- (2) <https://orcid.org/0000-0003-3807-0701>
- (3) <https://orcid.org/0000-0002-8112-8967>
- (4) <https://orcid.org/0000-0002-8620-2855>
- (5) <https://orcid.org/0000-0002-5292-2926>

hydrogen atmosphere of dissociated ammonia employing a GSMP-75 research and testing socket equipped with a PSF-12/75 retort furnace is used. The maximum sintering temperature is 1200°C. In addition, examples of scientific and research work carried out as part of international projects financed from EU FP7 and Horizon 2020, as well as national projects executed in cooperation with industry are discussed. Selected research results concerning composite cutting sectors used in saws for cutting stones, composite cap electrodes used in robotic spot welding stations and cutting inserts made of cemented carbides used in metal machining were presented. In addition, the branches of industry were identified for which the Łukasiewicz Research Network – Metal Forming Institute performs scientific and research works and executes implementations. A cooperation offer for industry was also presented.

Keywords: powder metallurgy, compacting, sintering, spark plasma sintering

1. WPROWADZENIE

Rozwój techniki stawia przed inżynierią materiałową coraz to większe wymagania. Aby sprostać tym coraz bardziej rygorystycznym wymaganiom, należy poszukiwać nie tylko nowych rozwiązań materiałowych, ale stosować także nowe technologie wytwarzania. Dostępnych jest wiele technologii wytwarzania materiałów, a na szczególnym znaczeniu zyskuje metalurgia proszków. Do najbardziej znanych i powszechnie stosowanych metod metalurgii proszków zalicza się prasowanie matrycowe na zimno i następujące po nim spiekanie swobodne w atmosferze ochronnej [1]. Rozwijane są także metody prasowania na gorąco (HP) [2], izostatycznego prasowania na gorąco (HIP) [3], a ostatnimi laty także metody przyrostowe bazujące na spiekaniu laserowym (SLM) [4], metody wtryskowe (MIM) [5] oraz spiekanie wspomagane polem elektrycznym (FAST) [6]. Do najpopularniejszych metod FAST zalicza się spiekanie iskrowo-plazmowe (SPS). W metodzie SPS proszek umieszczony w grafitowej matrycy jest jednocześnie prasowany i spiekany. W odróżnieniu od konwencjonalnego prasowania, gdzie ciśnienie rzędu kilkuset MPa jest niezbędne do mechanicznego połączenia cząstek proszku i uzyskania wyprasek o wymaganej wytrzymałości, w metodzie SPS ciśnienie prasowania 50 MPa, w połączeniu z temperaturą spiekania niższą nawet o 300°C od spiekania swobodnego, pozwala uzyskiwać praktycznie lite materiały [7].

W ŁUKASIEWICZU – INOP realizowane są liczne prace naukowo-badawcze dotyczące wytwarzania materiałów metalicznych, ceramicznych

1. INTRODUCTION

Technological development places ever more demands on materials engineering. To meet these increasingly stringent requirements, not only new material solutions should be sought, but also new manufacturing technologies should be used. Many technologies are available to produce materials, and powder metallurgy is particularly gaining importance. The most well-known and commonly used methods of powder metallurgy include cold uniaxial pressing and subsequent sintering in a protective atmosphere [1]. The methods of hot pressing (HP) [2], hot isostatic pressing (HIP) have also developed [3], and recent years as well incremental methods based on selective laser melting (SLM) [4], metal injection molding (MIM) [5] and field assisted sintering technology (FAST) [6]. The most popular FAST methods include spark plasma sintering (SPS). In the SPS method, the powder placed in a graphite die is simultaneously compacted and sintered. In contrast to conventional pressing, where a pressure of several hundred MPa is necessary to mechanically join the powder particles and obtain compacts with the required strength, in the SPS method a compaction pressure of 50 MPa combined with a sintering temperature lower even by 300°C than free sintering makes it possible to obtain practically solid materials [7].

In ŁUKASIEWICZ – INOP, numerous scientific and research works on the production of metallic, ceramic and composite materials are carried out using the SPS method as part of statu-

i kompozytowych metodą SPS w ramach prac statutowych, projektów krajowych i międzynarodowych. Do najważniejszych zaliczyć można dwa projekty realizowane obecnie w ramach programu Horyzont 2020 „LightMe – An Open Innovation Ecosystem for upscaling production processes of lightweight metal alloys Composites” i „LightCoce – Building an Ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures”, a także kolejny zakończony już projekt w ramach 7 PR UE „PilotManu – Pilot manufacturing line for production of highly innovative materials”. Spośród projektów krajowych realizowanych wspólnie z przemysłem na uwagę zasługuje projekt współfinansowany przez NCBR w ramach tzw. szybkiej ścieżki pt. „Wytwarzanie innowacyjnych elektrod do nagrzewania i hartowania drutu oraz narzędzi do obróbki twardych materiałów z nanokrystalicznych proszków WC-Co spiekanych metodą SPS”. Ponadto w ŁUKASIEWICZU – INOP realizowane są prace naukowo-badawcze dotyczące konwencjonalnego prasowania jednoosiowego na zimno proszków na bazie żelaza i następującego po nim spiekania swobodnego w atmosferze azotowo-wodorowej zdysocjowanego amoniaku. W artykule przedstawiono wyniki badań uzyskane podczas realizacji projektów oraz ofertę dla przemysłu.

2. APARATURA BADAWCZA

Spiekanie metodą SPS w ŁUKASIEWICZU – INOP realizowane jest z wykorzystaniem urządzenia HP D 25-3 produkcji FCT Systeme. Urządzenie, przedstawione na rys. 1, umożliwia przeprowadzanie procesów spiekania w temperaturze do 2200°C z maksymalną siłą prasowania do 250 kN. Procesy realizowane są w próżni ($5 \cdot 10^{-2}$ mbar) lub w atmosferze ochronnej azotu, argonu lub wodoru. Szybkość nagrzewania, w zależności od objętości spiekanej materiału proszkowego, może dochodzić do 800°C/min. Z uwagi na specyfikę procesu czas spiekania nie przekracza 10 min.

tory works, as well as national and international projects. The most important are two projects currently being executed under the Horizon 2020 program “LightMe – An Open Innovation Ecosystem for upscaling production processes of lightweight metal alloys Composites” and “LightCoce – Building an Ecosystem for upscaling lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures”. What is more, another project already completed under the EU FP7 “PilotManu – Pilot manufacturing line for producing highly innovative materials”. Among the national projects executed jointly with industry, the project co-financed by the NCRD within the so-called fast path entitled “Manufacturing innovative electrodes for heating and hardening wire and tools for machining hard materials from WC-Co nanocrystalline powders sintered by SPS”. Moreover, in ŁUKASIEWICZ – INOP, scientific and research works are carried out regarding conventional cold uniaxial pressing of iron-based powders and subsequent free sintering in a nitrogen-hydrogen atmosphere of dissociated ammonia. The article presents the results of research obtained during the execution of projects and an offer for the industry.

2. RESEARCH APPARATUS

Sintering using the SPS method in ŁUKASIEWICZ – INOP is carried out using an HPD 25-3 furnace manufactured by FCT Systeme. The device, shown in Fig. 1, enables sintering processes to be conducted at temperatures up to 2200°C with a maximum compaction force up to 250 kN. The processes are performed in vacuum ($5 \cdot 10^{-2}$ mbar) or in a protective atmosphere of nitrogen, argon or hydrogen. The heating rate, depending on the volume of sintered powder material, can reach 800°C/min. Due to the specificity of the process, the sintering time does not exceed 10 min.



Rys. 1. Urządzenie SPS HP D 25-3 w ŁUKASIEWICZU – INOP

Fig. 1. HP D 25-3 SPS furnace in ŁUKASIEWICZ – INOP

W przypadku konwencjonalnych metod metalurgii proszków w ŁUKASIEWICZU – INOP prasowanie matrycowe na zimno realizowane jest z wykorzystaniem pras o sile do 400 kN, natomiast spiekanie swobodne w atmosferze azotowo-wodorowej zdysocjowanego amoniaku realizowane jest z wykorzystaniem gniazda technologicznego GSMP-75 produkcji Remix na bazie pieca wgłębnego retortowego PSF-12/75. Widok gniazda technologicznego przedstawiono na rys. 2. Zastosowany piec PSF-12/75 umożliwia przeprowadzanie procesów spiekania w temperaturze do 1200°C.

In the case of conventional powder metallurgy methods in ŁUKASIEWICZ – INOP, cold uniaxial pressing is carried out using a compaction force of 400 kN, while free sintering in a nitrogen-hydrogen atmosphere of dissociated ammonia is conducted using a GSMP-75 technological socket from Remix based on the PSF-12/75 retort furnace. The view of the technological socket is shown in Fig. 2. The employed PSF-12/75 furnace enables sintering processes to be carried at temperatures up to 1200°C.



Rys. 2. Gniazdo badawczo-doświadczalne GSMP-75 w ŁUKASIEWICZU – INOP

Fig. 2. GSMP-75 research and testing socket in ŁUKASIEWICZ – INOP

3. WYNIKI BADAŃ

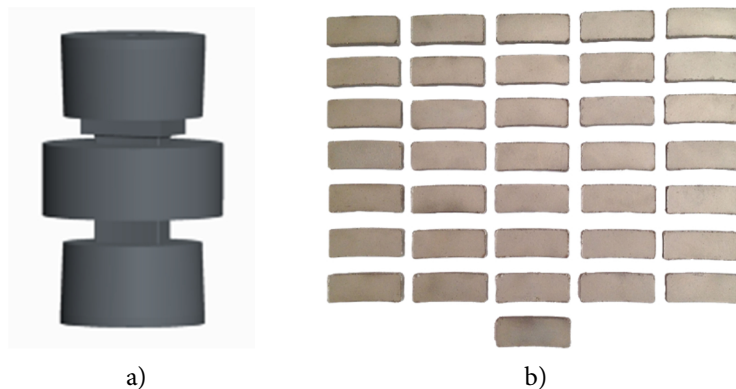
Zarówno zwiększające się zapotrzebowanie na materiały do cięcia i obróbki skał oraz kamieni naturalnych, jak i rosnące ceny kobaltu, który obecnie jest najpopularniejszym materiałem

3. RESEARCH RESULTS

The increasing demand for materials for cutting and processing rocks and natural stones, as well as the increasing prices of cobalt, which is currently the most popular material binding dia-

wiążącym cząstki diamentu w segmentach tnących, wymaga podjęcia badań nad nowymi, tańszymi zamiennikami stosowanych obecnie materiałów. W segmentach tnących elementem roboczym są cząstki diamentu. Zadaniem osnowy jest nie tylko jak najdłuższe utrzymywanie diamentu w osnowie, ale także zużywanie się z szybkością, umożliwiającą wypadanie zużytych cząstek, odsłaniając nowe, zdolne do cięcia kryształy. W ten sposób następuje samoostrzenie się segmentów tnących. Materiał osnowy powinien charakteryzować się także dużą twardością i wysoką granicą plastyczności, co przyczynia się do zmniejszenia podatności na pękanie osnowy wokół cząstek diamentu. Najbardziej obiecujące są stopy żelaza z miedzią, wytwarzane metodami chemicznymi. Znaczące obniżenie kosztów możliwe jest dzięki zastosowaniu metod mechanicznej syntezy, co było m.in. jednym z celów projektu PilotManu. Zadaniem ŁUKASIEWICZA – INOP, w ramach realizacji tego projektu, było wykonanie diamentowych segmentów tnących z proszku stopu żelaza z miedzią z dodatkiem diamentu, stosując przy tym zmodyfikowane narzędzia grafitowe (rys. 3a). W efekcie uzyskano spiekane segmenty (rys. 3b) przeznaczone do bezpośredniego montażu na tarczy tnącej o średnicy 600 mm.

mond particles in cutting segments, requires undertaking research on new, less expensive substitutes for currently used materials. Diamond particles are the working parts in the cutting segments. The purpose of the matrix is not only to keep the diamond in the matrix as long as possible, but also to wear at a rate that allows the used particles to fall out, revealing new, cleavable crystals. In this way, the cutting segments self-sharpen. The matrix material should also be characterized by high hardness and high yield strength, which contributes to reducing the susceptibility of the matrix to cracking around the diamond particles. The most promising are iron and copper alloys, produced by chemical methods. A significant reduction in costs is possible thanks to the use of mechanical synthesis methods, which was, among others, one of the objectives of the PilotMan project. The task of the ŁUKASIEWICZ – INOP, as part of this project, was to produce diamond cutting segments from iron-copper alloy powder with the addition of diamond, using modified graphite tools (Fig. 3a). As a result, sintered segments were obtained (Fig. 3b) for direct mounting on a cutting disc with a diameter of 600 mm.



Rys. 3. Zestaw narzędzi grafitowych (a) oraz kompozytowe segmenty tnące wykonane metodą SPS (b)

Fig. 3. Graphite tool set (a) and composite cutting segments made by SPS (b)

W ramach tego samego projektu, w wyniku połączenia technologii spiekania SPS i wyciskania KOBO, wykonano elektrody do zgrzewania punktowego z proszku kompozytowego $\text{Cu-1Al}_2\text{O}_3$ (% wag.), otrzymanego w procesie wysokoenergetycznego mielenia kulowego (HEBM).

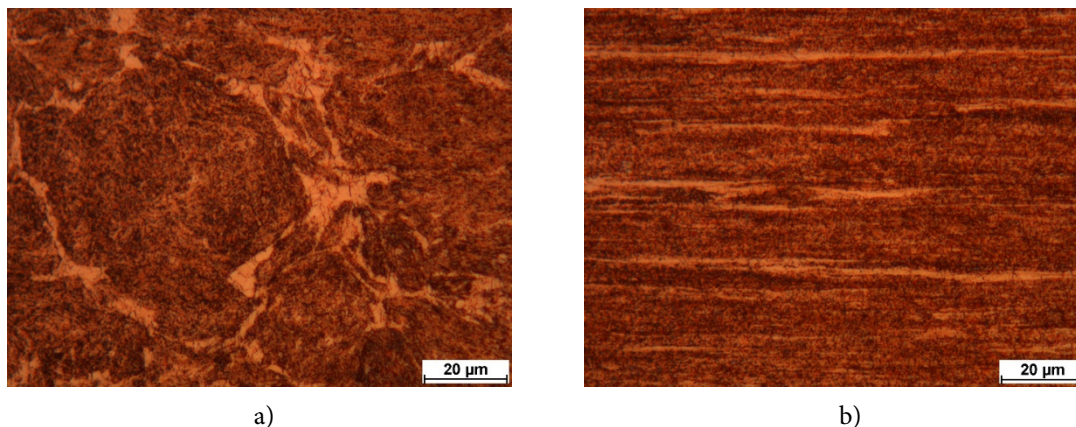
As part of the same project, as a result of the combination of SPS sintering technology and KOBO extrusion, spot welding electrodes made of $\text{Cu-1Al}_2\text{O}_3$ composite powder (wt%), were obtained in the high energy ball milling (HEBM) process. The cap electrodes shown in Fig. 4 are cha-

Wykonane elektrody nasadkowe, przedstawione na rys. 4, charakteryzują się twardością 152 HV_{0,5} oraz przewodnością elektryczną 72% IACS. Na rys. 5 przedstawiono mikrostrukturę materiału kompozytowego po spiekaniu metodą SPS (rys. 5a) oraz wyciskaniu metodą KOBO (rys. 5b). W ujawnionej mikrostrukturze, w wyniku wyciskania metodą KOBO, na skutek silnych odkształceń plastycznych nastąpiło zdefektowanie mikrostruktury. Zaobserwowano pasmowe ułożenie ziaren, w kierunku równoległym do kierunku wyciskania. Ziarna zostały rozdrobnione oraz wydłużone, co jest charakterystyczne dla materiałów wyciskanych na zimno.

characterized by a hardness of 152 HV_{0,5} and an electrical conductivity of 72% IACS. Fig. 5 shows the microstructure of the composite material after sintering by the SPS method (Fig. 5a) and extrusion by the KOBO method (Fig. 5b). In the revealed microstructure, as a result of extrusion by the KOBO method, on account of strong plastic deformations, the microstructure was damaged. A banded grain arrangement was observed in a direction parallel to the extrusion direction. The grains were crushed and elongated, which is characteristic of cold extruded materials.



Rys. 4. Elektrody nasadkowe do zgrzewania punktowego z kompozytu Cu-Al₂O₃, wykonane metodą łączoną SPS-KOBO
Fig. 4. Cu-Al₂O₃ cap electrodes for spot welding made with combined SPS-KOBO method



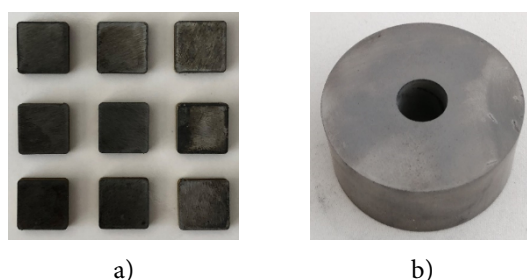
Rys. 5. Mikrostruktura elektrody nasadkowej wykonanej metodą SPS (a) i następnie KOBO (b)
Fig. 5. Microstructure of cap electrode made by SPS (a) and then KOBO (b)

W ramach projektu realizowanego wspólnie z przedsiębiorstwem Usługi Ślusarskie mgr inż. Paweł Siwak pt. „Wytwarzanie innowacyjnych elektrod do nagrzewania i hartowania drutu oraz narzędzi do obróbki twardych materiałów z nanokrystalicznych proszków WC-Co spiekanych metodą SPS”, stosując zmodyfikowane narzędzia grafitowe wykonano z nanokrystalicznych węglików spiekanych WC-5Co

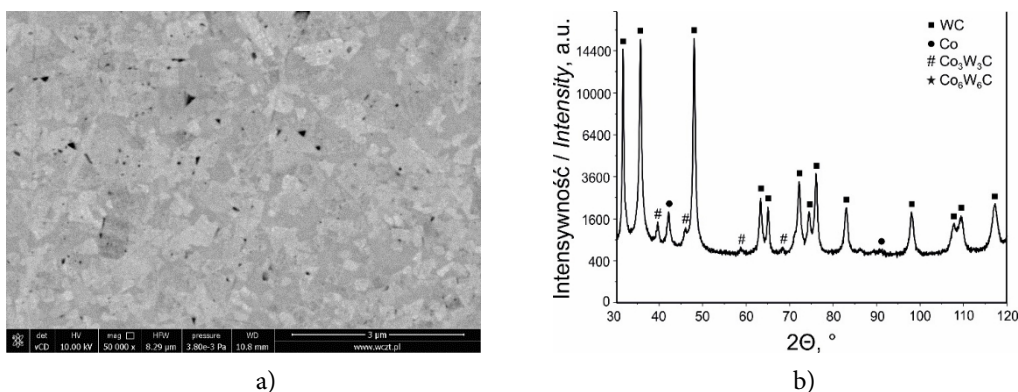
As part of the project carried out jointly with the company Usługi Ślusarskie mgr inż. Paweł Siwak entitled “Manufacturing innovative electrodes for heating and hardening wire and tools for machining hard materials from WC-Co nanocrystalline powders sintered by SPS”, nanocrystalline WC-5Co cemented carbide cutting inserts (Fig. 6a) used in metal machining, and electrodes for heating and hardening wire (Fig. 6b), applicable

płytki skrawające (rys. 6a) stosowane w obróbce mechanicznej oraz elektrody do nagrzewania i hartowania drutu (rys. 6b), mające zastosowanie w liniach technologicznych służących do produkcji sprężyn na potrzeby przemysłu meblarskiego. W efekcie uzyskano węgliki spiekane WC-5Co oraz WC-5Co-1Cr₃C₂ o twardości wynoszącej odpowiednio 1861 oraz 1897 HV₃₀ i odporności na kruche pękanie wynoszącej odpowiednio 9,30 oraz 9,84 MPa·m^{1/2}. Mikrostrukturę płytki skrawającej WC-5Co przedstawiono na rys. 7a, natomiast wyniki rentgenowskiej analizy fazowej przedstawiono w postaci dyfraktogramu na rys. 7b. Analiza ta wykazała, że oprócz pierwotnej fazy węgliku wolframu i kobaltu, w strukturze obecne są fazy η (Co₃W₃C, Co₆W₆C), które są powszechnie uważane za niepożądane. W przypadku wykonanych płytek, obecność tych faz nie spowodowała zmniejszenia twardości i odporności na kruche pękanie, co jest jednym z przykładów zalet metody SPS.

in technological lines for the production of springs for the furniture industry were made using modified graphite tools. As a result, WC-5Co and WC-5Co-1Cr₃C₂ sintered carbides with the hardness of 1861 and 1897 HV₃₀ and fracture toughness of respectively 9.30 and 9.84 MPa·m^{1/2} were obtained. The microstructure of the WC-5Co cutting insert is shown in Fig. 7a, while the results of X-ray phase analysis are presented in the form of a diffractogram in Fig. 7b. This analysis showed that in addition to the initial tungsten carbide and cobalt phase, η (Co₃W₃C, Co₆W₆C) phases are present in the structure, which are generally considered undesirable. In the case of the produced inserts, the presence of these phases did not reduce the hardness and fracture toughness, which is one example of the advantages of the SPS method.



Rys. 6. Płytki skrawające (a) oraz elektroda do nagrzewania i hartowania drutu (b) z kompozytu WC-5Co wykonane metodą SPS
Fig. 6. Cutting inserts (a) and electrode for heating and hardening wire (b) WC-5Co made by SPS method



Rys. 7. Mikrostruktura (a) oraz skład fazowy (b) płytki skrawającej wykonanej metodą SPS
Fig. 7. Microstructure (a) and phase composition (b) of cutting insert made using SPS method

W ramach rozpoczętych w 2019 roku dwóch projektów międzynarodowych, finansowanych z programu Horyzont 2020, ŁUKASIEWICZ – INOP będzie opracowywać nowe materiały prze-

As part of two international projects initiated in 2019 financed from the Horizon 2020 program, ŁUKASIEWICZ – INOP will develop new materials for applications in the space indus-

znaczone do zastosowań w przemyśle kosmicznym w ramach projektu LightCoce oraz w przemyśle motoryzacyjnym w ramach projektu LightMe. Nowo opracowywane materiały wykonywane będą za pomocą technologii SPS. W ramach projektu LightCoce z ceramicznych materiałów kompozytowych o przewodności cieplnej na poziomie 1–6 W/m·K wykonywane będą demonstratory stożków czołowych stosowanych w statkach kosmicznych, z kolei z materiałów kompozytowych na bazie tytanu wykonywane będą elementy zaworów stosowanych w układach optoelektronicznych satelit. W ramach projektu LightMe, za pomocą łączącej technologii spiekania SPS i wyciskania KOBO, wykonywane będą m.in. śruby o podwyższonej wytrzymałości i zredukowanej masie z materiałów kompozytowych na podstawie stopów aluminium wzmacnianych węglikiem boru i węglikiem krzemu, mające zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym.

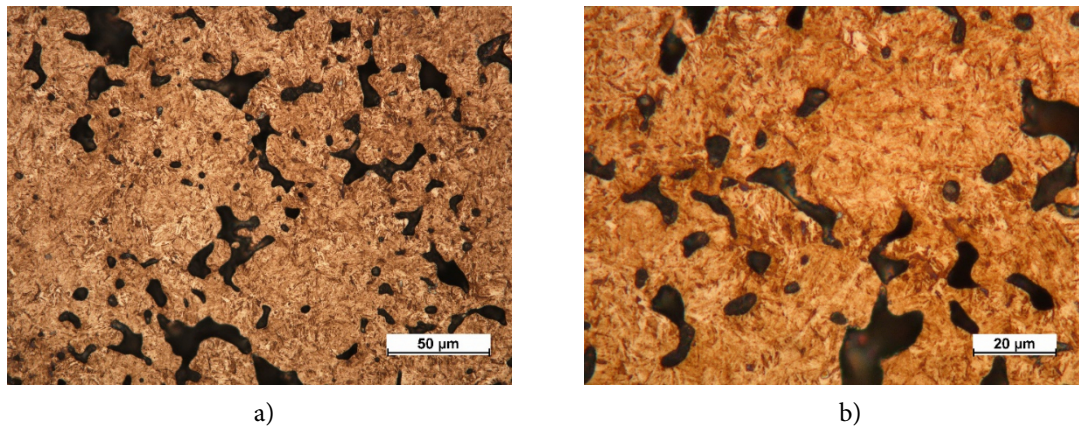
W przypadku wykonywania wyrobów z proszków na bazie żelaza w ŁUKASIEWICZU – INOP stosuje się konwencjonalną technologię metalurgii proszków, czyli prasowanie jednoosiowe na zimno w stalowych matrycach oraz spiekanie swobodne w atmosferze azotowo-wodorowej zdysocjowanego amoniaku. Przykładem wyrobu wykonywanego w operacji prasowania i spiekania jest pierścień krzywkowy z proszku Astalloy Mo (rys. 8a) stosowany w pompach paliwowych silników wysokoprężnych. Wyroby wykonywane konwencjonalnymi metodami metalurgii proszków mogą być również poddawane obróbce cieplno-chemicznej. Przykładem wyrobu poddawanego takiej obróbce (azotonawęglanie) jest klin (rys. 8b) stosowany w zawiasach okiennych. Ze względu na charakter pracy klina, który przenosi znaczne obciążenia, wymagana jest od niego wysoka twardość i odporność na ścieranie. Na rys. 9 przedstawiono mikrostrukturę klina po azotonawęglaniu (w atmosferze metanolu, propanu, azotu i amoniaku) i następującym po nim hartowaniu próżniowym w oleju. W ujawnionej mikrostrukturze występuje martenzyt listwowy z niewielkim udziałem austenitu szczątkowego. Widoczne są także pory. Twardość wykonanych klinów wynosi 50–53 HRC.

try as part of the LightCoce project and in the automotive industry under the LightMe project. The newly developed materials will be made using SPS technology. As part of the LightCoce project, demonstrators of nose cones used in spacecraft will be made from ceramic composite materials with thermal conductivity at the level of 1–6 W/m·K, while the valve elements used in optoelectronic satellite systems will be made from composite materials based on titanium. As part of the LightMe project, among others fasteners with increased strength and reduced weight, applicable in the automotive industry, will be made using the combined technology of SPS and KOBO extrusion from composite materials based on aluminum alloys reinforced with boron carbide and silicon carbide.

In the case of making products from iron-based powders, ŁUKASIEWICZ – INOP uses conventional powder metallurgy technology, i.e. cold uniaxial pressing in steel dies and free sintering in a nitrogen-hydrogen atmosphere of dissociated ammonia. An example of a product made in the pressing and sintering operation is a cam ring made of Astalloy Mo powder (Fig. 8a) used in diesel fuel pumps. Products made by means of conventional powder metallurgy methods can also be subjected to thermo-chemical treatment. An example of a product subjected to such treatment (nitrocarburizing) is a wedge (Fig. 8b) used in window hinges. Due to the nature of the work of the wedge, which carries heavy loads, it requires high hardness and abrasion resistance. Fig. 9 shows the microstructure of the wedge after nitrocarburizing (in the atmosphere of methanol, propane, nitrogen and ammonia) followed by vacuum hardening in oil. In the revealed microstructure, lath martensite with a small proportion of residual austenite occurs. Pores are also visible. The hardness of the produced wedges is 50–53 HRC.



Rys. 8. Pierścienie krzywkowe (a) oraz klin (b) wykonane z proszku na bazie Fe konwencjonalnymi metodami metalurgii proszków
Fig. 8. Cam rings (a) and wedges (b) made of Fe-based powder by conventional powder metallurgy methods



Rys. 9. Mikrostruktura klina wykonanego konwencjonalnymi metodami metalurgii proszków po azotonawęglaniu
Fig. 9. Microstructure of wedge made by conventional powder metallurgy methods after nitrocarburizing

Konwencjonalnymi metodami metalurgii proszków wykonywane są również wyroby o podwyższonej gęstości, m.in. pierścienie o gęstości $7,65 \text{ g/cm}^3$ i twardości 60-64 HRC (rys. 10) na potrzeby przemysłu włókienniczego. Wyrób ten powstaje w kilku operacjach takich, jak: prasowanie, spiekanie wstępne, dokuwanie, spiekanie.

Products of increased density are also made by conventional powder metallurgy methods, among others rings with a density of 7.65 g/cm^3 and hardness 60-64 HRC (Fig. 10) for the needs of the textile industry. This product is made in several operations, such as pressing, presintering, re-pressing, sintering.



Rys. 10. Pierścienie ułożone w koszykach po spiekanii wstępnym
Fig. 10. Rings arranged in baskets after presintering

4. PODSUMOWANIE

W ŁUKASIEWICZU – INOP realizowane są prace naukowo-badawcze dotyczące wytwarzania zaawansowanych materiałów metodą SPS. Ponadto rozwijana jest konwencjonalna technologia metalurgii proszków. W ten sposób wykonywane są wyroby z proszków na bazie żelaza do zastosowań w wielu obszarach gospodarki. ŁUKASIEWICZ – INOP oferuje możliwość wykonywania wyrobów z zaawansowanych materiałów spiekanych metodą SPS o średnicy do 60 mm i wysokości do 25 mm w temperaturze do 2200°C, np. segmentów tnących, elektrod nasadkowych, płytek skrawających i innych. Z kolei metodami konwencjonalnej metalurgii proszków wykonywane mogą być wyroby z proszków na bazie żelaza o wysokiej gęstości (ok. 7,7 g/cm³) i twardości (ok. 60 HRC) w ilości do miliona sztuk rocznie. Oferta ŁUKASIEWICZA – INOP skierowana jest głównie do przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, kosmicznego, maszynowego, meblarskiego, włókienniczego i budownictwa.

PODZIĘKOWANIA

Prace prowadzące do tych wyników uzyskały finansowanie ze środków 7. Programu Ramowego Unii Europejskiej FP7/2007-2013 na podstawie umowy w sprawie przyznania grantu nr NMP3-SE-2013-604344.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2013–2017 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego.

Prace badawcze zrealizowano w ramach projektu nr POIR.01.01.01-00-0267/16 pt. „Wytwarzanie innowacyjnych elektrod do nagrzewania i hartowania drutu oraz narzędzi do obróbki twardych materiałów z nanokrystalicznych proszków WC-Co spiekanych metodą SPS” współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Niniejsze badania stanowią część projektu sfinansowanego ze środków programu ramowego

4. SUMMARY

In ŁUKASIEWICZ – INOP, scientific and research works are carried out regarding the production of advanced materials using the SPS method. In addition, conventional powder metallurgy technology is being developed. In this way, products are made of iron-based powders for use in many areas of the economy. The ŁUKASIEWICZ – INOP offers the possibility of making products from advanced sintered materials using the SPS method with a diameter of up to 60 mm and a height of up to 25 mm at a temperature of up to 2200°C, e.g. cutting segments, cap electrodes, cutting inserts and others. In turn, up to a million pieces per year of products from iron-based powder with a high-density (about 7.7 g/cm³) and hardness (about 60 HRC) can be made using conventional powder metallurgy methods. The offer of ŁUKASIEWICZ – INOP is mainly targeted at the automotive, aerospace, machine, furniture, textile and construction industries.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work leading to these results was financed from the funds of the 7th Framework Program of the European Union FP7/2007-2013 based on grant agreement No. NMP3-SE-2013-604344.

Scientific work financed from financial resources for science in 2013–2017 was granted for the implementation of an international co-financed project.

Research work was carried out as part of project No. POIR.01.01.01-00-0267/16 entitled “Manufacturing innovative electrodes for heating and hardening wire and tools for machining hard materials from WC-Co nanocrystalline powders sintered by SPS” was co-financed by the National Center for Research and Development.

This research is part of a project that has received funding from the European Union’s Horizon 2020

Unii Europejskiej w zakresie badań naukowych i innowacji „Horyzont 2020” na podstawie umowy o udzielenie dotacji nr 814632.

Niniejsze badania stanowią część projektu sfinansowanego ze środków programu ramowego Unii Europejskiej w zakresie badań naukowych i innowacji „Horyzont 2020” na podstawie umowy o udzielenie dotacji nr 814552.

research and innovation programme under grant agreement No 814632.

This research is part of a project that has received funding from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 814552.

LITERATURA

- [1] Wiśniewski T., W. Majchrzak, D. Garbiec, F. Heyduk. 2012. „Proces spiekania wyrobów wykonywanych technologią metalurgii proszków”. *Obróbka Plastyczna Metali* 23 (1): 29–38.
- [2] Borowiecka-Jamrozek J., J. Lachowski. 2017. „Właściwości spieków otrzymywanych techniką prasowania na gorąco z proszków Fe, Cu i Ni”. *Mechanik* 11: 1066–1068.
- [3] Stradomski G., A. Wróbel. 2016. „Analiza odporności erozyjnej materiałów spiekanych na bazie stali X2CrNi18-9 wykonanych różnymi technikami”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 83 (5): 238–241.
- [4] Stwora A., G. Skrabalak. 2016. „Wpływ parametrów technologicznych procesu selektywnego topienia laserowego na wybrane właściwości elementów wykonanych z proszków stopu AlSi10Mg”. *Mechanik* 3: s. 206–209.
- [5] Biało D., A. Skalski, L. Paszkowski. 2008. „Specyfika procesu formowania wtryskowego mikroelementów z proszków metali”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 53 (4): 241–245.
- [6] Laptev A. 2016. „Modelowanie jako narzędzie do zrozumienia i udoskonalenia techniki iskrowego spiekania plazmowego”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (3): 223–240.
- [7] Garbiec D. 2015. „Iskrowe spiekanie plazmowe (SPS): teoria i praktyka”. *Inżynieria Materiałowa* 36 (2): 60–64.

REFERENCES

- [1] Wiśniewski T., W. Majchrzak, D. Garbiec, F. Heyduk. 2012. „Sintering process of products made using powder metallurgy technology”. *Obróbka Plastyczna Metali* 23 (1): 29–38.
- [2] Borowiecka-Jamrozek J., J. Lachowski. 2017. „Właściwości spieków otrzymywanych techniką prasowania na gorąco z proszków Fe, Cu i Ni”. *Mechanik* 11: 1066–1068.
- [3] Stradomski G., A. Wróbel. 2016. „Analiza odporności erozyjnej materiałów spiekanych na bazie stali X2CrNi18-9 wykonanych różnymi technikami”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 83 (5): 238–241.
- [4] Stwora A., G. Skrabalak. 2016. „Wpływ parametrów technologicznych procesu selektywnego topienia laserowego na wybrane właściwości elementów wykonanych z proszków stopu AlSi10Mg”. *Mechanik* 3: s. 206–209.
- [5] Biało D., A. Skalski, L. Paszkowski. 2008. „Specyfika procesu formowania wtryskowego mikroelementów z proszków metali”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 53 (4): 241–245.
- [6] Laptev A. 2016. „Modeling as a tool for understanding and improvement of Spark Plasma Sintering technique”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (3): 223–240.
- [7] Garbiec D. 2015. „Iskrowe spiekanie plazmowe (SPS): teoria i praktyka”. *Inżynieria Materiałowa* 36 (2): 60–64.

